

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ДГТУ
Вестник
Донского
государственного
технического
университета
ДГТУ
85
1930-2015
Vestnik of Don State Technical University
Том 15
№3 (82)
2015
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ
И НАУЧНО-
ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ
ISSN 1992-5980
DOI 10.12737/issn.1992-5980
МЕХАНИКА
Mechanics
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
Machine Building and Machine Science
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
Information Technology, Computer Science, and Management
ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
Processes and Machines of Agro-Engineering Systems
БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
Safety of Human Activity
science.donstu.ru

ВЕСТНИК
ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2015
Т. 15, № 3 (82)

Теоретический и научно-практический журнал

Рекомендован ВАК для публикаций основных научных результатов диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума ВАК Минобрнауки России от 19 февраля 2010 года № 6/6)

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
Июль-сентябрь 2015 г.

Учредитель и издатель — Донской государственный технический университет

Главный редактор — председатель Редакционного совета Б. Ч. Месхи

Редакционный совет:
Торстен Бертрам (Германия), И. Вернер (Израиль), Лару К. Гиллеспи (США), О. В. Дворников (Беларусь), Г. Г. Матишов (Россия), В.И. Минкин (Россия), Нгуен Донг Ань (Вьетнам), И. Б. Севостьянов (США), Юха Контио (Финляндия).

Редакционная коллегия:
зам. главного редактора — В. П. Димитров
ответственный редактор — М. Г. Комахидзе
ответственный секретарь — Е. В. Петрова

Механика:
ведущий редактор по направлению - А. Н. Соловьёв
Редколлегия направления: С. М. Айзикович, В. Л. Заковоротный, И. Я. Никифоров, Д. А. Пожарский

Машиностроение и машиноведение:
ведущий редактор по направлению - В. В. Илясов
Редколлегия направления: А. П. Бабичев, Г. И. Бровер, М. Е. Попов, А. А. Рыжкин, М. А. Тамаркин, М. П. Шишкарёв

Информатика, вычислительная техника и управление:
ведущий редактор по направлению - Р. А. Нейдорф
Редколлегия направления: Д. А. Безуглов, А. К. Тугенгольд

Процессы и машины агроинженерных систем:
ведущий редактор по направлению - В. И. Пахомов
Редколлегия направления: Ю. И. Ермольев, И. А. Хозяев

Безопасность деятельности человека:
ведущий редактор по направлению - А. Н. Чукарин
Редколлегия направления: Ю. И. Булыгин

Над номером работали: И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)
Подписано в печать 28.09.2015., дата выхода в свет 30.09.2015.
Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman» Печать офсетная.
Усл. печ. л. 22,6. Тираж 1000 экз. Заказ № 13/10 Цена свободная.

Адрес редакции:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.

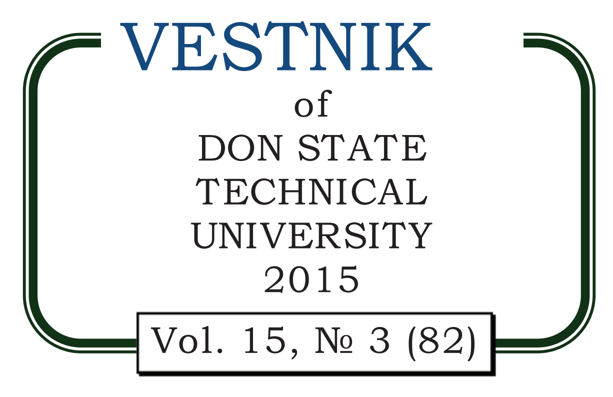
Адрес издателя:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.

Адрес полиграфического предприятия:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.

http://science.donstu.ru

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-35012 от 16.01.09., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций

© Донской государственный технический университет, 2015



**Theoretical
and scientific-practical journal**

Recommended by the State Commission for Academic Degrees and Titles for publications of the thesis research results for Doctor's and Candidate Degree (the solution of the Presidium of the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Education and Science Ministry, February 19, 2010, № 6/6)

Founded in 1999

4 issues a year
July — September 2015

Founder and publisher — Don State Technical University

Editor-in-Chief — Editorial Board Chairman Besarion C. Meskhi

Editorial Board:

Nguyen Dong Ahn (Vietnam), Torsten Bertram (Germany), Oleg Dvornikov (Belarus), LaRoux K. Gillespie (USA), Juha Kontio (Finland), Gennady Matishov (RF), Vladimir Minkin (RF), Igor Sevostianov (USA), Igor Verner (Israel).

deputy chief editor — Valery P. Dimitrov
executive editor — Manana G. Komakhidze
executive secretary — Elena V. Petrova

Mechanics:
managing editor - Arkady N. Solovyev
Editorial Board: Dmitry A. Pozharskiy,
Igor Y. Nikiforov, Sergey M. Aizikovich, Vilor L. Zakovorotny

Machine Building and Machine Science:
managing editor - Victor V. Ilyasov
Editorial Board: Anatoly A. Ryzhkin, Anatoly P. Babichev,
Galina I. Brover, Mikhail A. Tamarkin, Mikhail E. Popov, Mikhail P. Shishkarev

Information Technology, Computer Science, and Management:
managing editor – Rudolf A. Neydorf
Editorial Board: Andrey K. Tugengold, Dmitry A. Bezuglov

Processes and Machines of Agro-Engineering Systems:
managing editor - Victor I. Pakhomov
Editorial Board: Igor A. Khozyayev, Yury I. Yermolyev

Safety of Human Activity:
managing editor - Alexander N. Chukarin
Editorial Board: Yury I. Bulygin

The issue is prepared by: Inna V. Boyko, Marina P. Smirnova (English version)
Passed for printing 28.09.2015, imprint date 30.09.2015.
Format 60×84/8. Font «Times New Roman». Offset printing.
C.p.sh. 22.6. Circulation 1000 cop. Order 13/10. Free price.
Editorial Board's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.
Publisher's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.
Printery address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.
http://science.donstu.ru
Certificate of mass media registration ПИ № ФС 77-35012 of 16.01.09. issued by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications and Mass Communications

© Don State Technical University, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО



К 100-летию со дня рождения Владимира Алексеевича Терликова
Marking the centenary of Vladimir A. Terlikov's birth



Владимир Алексеевич Терликов родился 15.07.1915 в Таганроге в рабочей семье. В 1933 году окончил железнодорожное ФЗУ и поступил на рабфак только что созданного в Ростове-на-Дону механического института (РМИ), а затем продолжил образование на механическом факультете, который окончил в 1940 году.

Трудовой путь Владимир Алексеевич Терликов начал инженером-конструктором в конструкторском бюро завода «Красный Аксай».

Великая Отечественная война сломала мирные планы молодых специалистов — семьи Владимира Алексеевича и Тамары Феоктистовны Терликовых.

Супруги записались добровольцами в Красную Армию. Владимир Алексеевич окончил курсы начальников штабов Артиллерийской академии. Терликовы служили вместе до 1944 года. В 1944 году у них родился сын. В честь будущей Победы его назвали Виктором. Тамара Феоктистовна занялась уходом за новорожденным ребенком, а Владимир Алексеевич продолжал служить и встретил Победу на Эльбе в звании майора, начальника штаба артполка.

Демобилизовавшись из рядов Советской Армии в 1946 году, Владимир Алексеевич вернулся в родной институт и занял должность старшего лаборанта на кафедре «Детали машин». Тамара Феоктистовна начала работать на кафедре «Технология машиностроения».

Работая преподавателем кафедры «Детали машин», Владимир Алексеевич активно занимался научной работой. Тема его кандидатской диссертации — «Исследование конструкции рамы комбайна «Сталинец-6» и определение усилий в элементах рамы» была утверждена Президиумом АН ССР и Министерством высшего образования СССР.

В 1952 году, успешно защитив диссертационную работу в Одесском политехническом институте, Влади-

Vladimir A. Terlikov was born on July 15, 1915, in Taganrog, into a worker's family. In 1933, he graduated from the railway factory apprenticeship school and entered the workers' faculty of the newly created Mechanics Institute in Rostov-on-Don (RMI). Then he continued his education at the Mechanics Faculty and graduated from it in 1940.

Vladimir A. Terlikov embarked upon his career as a design engineer in the construction department of the "Krasny Aksay" plant.

The Great Patriotic War broke the peace plans of the young professionals – Vladimir Alexeyevich and Tamara Feoktistovna Terlikovs.

The couple volunteered for the Red Army. Vladimir graduated from the courses of Chiefs of Staff of the Artillery Academy. The Terlikovs served together until 1944. In 1944, their son was born. They named him Victor in honor of the future Victory. Tamara Feoktistovna nursed the newborn child, and Vladimir Alexeyevich went on to serve in the army. He met the Victory on the Elbe in the rank of major, a chief of staff of the artillery regiment.

Having left the Soviet Army in 1946, Vladimir Alexeyevich returned to his native institute and was appointed senior lab assistant of the Machine Parts Department. Tamara Feoktistovna started working at the Engineering Technology Department.

While working as a teacher at the Machine Parts Department, Vladimir Alexeyevich actively carried out research. The topic of his PhD dissertation – "Study of the combine *Stalinets-6* frame design and frame element forces analysis" – was approved by the Presidium of the USSR and the Ministry of Higher Education of the USSR.

In 1952, he successfully defended his thesis at the Odessa Polytechnic Institute, enthusiastically took up the

мир Алексеевич с энтузиазмом взялся за создание научно-исследовательского подразделения в институте (научно-исследовательский сектор — НИС) и стал первым его руководителем. Была создана научно-исследовательская лаборатория прочности по направлению «Исследование динамики, прочности и надежности несущих конструкций сельскохозяйственных машин», которая превратилась в большой, плодотворно работающий отдел прочности. В 1973 году Владимир Алексеевич Терликов защитил докторскую диссертацию по этому направлению.

Более 30 лет в Ростовском институте сельскохозяйственного машиностроения (в настоящее время ДГТУ) В. А. Терликов возглавлял кафедру «Детали машин» и являлся научным руководителем отдела прочности и направления «Исследование динамики, прочности и надежности несущих конструкций сельскохозяйственных машин». В течение этих трех десятилетий сотрудники кафедры и отдела выполнили большой объем НИР по заявкам ведущих предприятий сельхозмашиностроения: «Ростсельмаш», «Красный Аксай», Таганрогский комбайновый завод, Рязанский комбайновый завод, Херсонский комбайновый завод, «Гомсельмаш», «Коломыясельмаш» и т. д. Кафедра имела научные связи с ведущими НИИ отрасли — ВИСХОМ, НАТИ, ВИМ.

Под научным руководством В. А. Терликова защищены три докторские диссертации и около тридцати кандидатских. Опубликованы монографии, учебно-методические пособия, научные статьи.

Владимир Алексеевич Терликов награжден высокими правительственными боевыми и трудовыми наградами. Он одним из первых удостоен звания почетный доктор ДГТУ.

Кафедра «Основы конструирования машин» (ранее «Детали машин»)помнит и чтит Владимира Алексеевича Терликова, много лет заведовавшего этой кафедрой, основателя и научного руководителя направления (школы) «Экспериментальные и теоретические исследования динамики, прочности и надежности конструкций сельскохозяйственных машин».

creation of a research unit at the Institute (research and development sector – R&DS), and became its first leader. A research structural laboratory in “Investigations of dynamics, strength and reliability of load-bearing structures of the agricultural machinery” was established. It turned into a big, fruitfully working strength department. In 1973, Vladimir A. Terlikov defended the doctoral thesis in this area.

For more than 30 years, V.A. Terlikov headed the Machine Parts Department and was the supervisor of the Strength Department and the “Investigations of dynamics, strength and reliability of load-bearing structures of the agricultural machinery” area. Over all these years, members of the departments carried out a large amount of research work on application of the leading enterprises of the agricultural machine building: “Rostselmash”, “Krasny Aksay”, Taganrog Combine Plant, Ryazan Combine Plant, Kherson Combine Plant, “Gomselmash”, “Kolomyyiaselmash”, etc. The department had scientific contacts with the leading research institutes of the industry – VISKhOM, NATI, VIM.

Under the scientific supervision of V.A. Terlikov, three doctoral theses and about thirty PhD dissertations were defended. Monographs, manuals, research papers were published.

Vladimir A. Terlikov was awarded high government war and labour awards. He was one of the first who was granted title of honour “Doctor Honoris causa” of DSTU.

The Machine Design Principles Department staff remembers and honours Vladimir A. Terlikov, head of this department over the years, founder and scientific supervisor of the “Experimental and theoretical studies of the dynamics, strength and reliability of load-bearing structures of the agricultural machinery” area (school).

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 531.383-11: 534.1 DOI 10.12737/12600

Метод скаляризации в задачах распространения поверхностных упругих волн во вращающемся трансверсально-изотропном полупространстве*

И. П. Мирошниченко[1], В. А. Погорелов[2], В. П. Сизов[3]**
[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2, 3] Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Scalarization method in problems of elastic surface-wave propagation in rotating transversely isotropic half-space***

I. P. Miroshnichenko[1], V. A. Pogorelov[2], V. P. Sizov[3]**
[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2, 3] Rostov Scientific Research Institute for Radiocommunication, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целями работы являются обобщение метода скаляризации динамических упругих полей в трансверсально-изотропных средах на задачи для сред, вращающихся с постоянной угловой скоростью, а также разработка научно-методического аппарата для описания влияния вращения на параметры поверхностных акустических волн. На основе указанного метода предложен научно-методический аппарат для конструирования новых гироскопов на акустических волнах. Получены и обоснованы соотношения для расчета параметров поверхностных акустических волн (ПАВ), распространяющихся на границе вращающегося полупространства из трансверсально-изотропного материала с произвольно расположенной осью материальной симметрии. Приведен пример численного моделирования для случая изотропного вращающегося полупространства. Предлагаемый научно-методический аппарат и примеры численного моделирования могут быть использованы для разработки новых видов гироскопов на акустических волнах для систем навигации, ориентации и управления различными подвижными объектами в авиации, робототехнике и т.п.

Ключевые слова: метод скаляризации, трансверсально-изотропная среда, акустические волны, поверхностные акустические волны.

The work objectives are to generalize the scalarization method of dynamic elastic fields in the transversely isotropic media to the tasks for the environments rotating with a constant angular velocity, and to develop the methodological apparatus for describing the effect of rotation on the parameters of surface acoustic waves. On the basis of this method, the scientific-methodical device for the construction of new acoustic-wave gyroscopes is proposed. Parameter determination ratios for surface-acoustic waves (SAW) propagating on the boundary of the rotating half-space of the transversely isotropic material with arbitrarily spaced axis of material symmetry are obtained and validated. An example of the numerical simulation for the isotropic rotating half-space case is given. The proposed methodological apparatus and numerical simulation examples can be used to develop new types of gyroscopes on acoustic-wave systems for navigation, guidance and control of various mobile objects in aviation, robotics, etc.

Keywords: scalarization method, transversely isotropic medium, acoustic waves, surface acoustic wavesj.

Введение. При решении задач динамической теории упругости успешно применяется метод скаляризации [1–3], заключающийся в представлении тензорных полей перемещений, напряжений и деформаций через независимые скалярные функции [4–6]. Применение данного метода существенно облегчает решение многих задач по определению упругих полей в различных конструкциях. Так, в [4] определено напряженно-деформированное состояние (НДС) в многослойной цилиндрической трубе при динамических нагрузках. В [5] рассчитано НДС в слоистой цилиндрической

Механика

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: Ipmir2011@yandex.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

конструкции при многократном воздействии локальных динамических нагрузок. В [6] дан анализ динамического поведения анизотропных многослойных конструкций и т. д.

Целью настоящей работы является обобщение данного метода на задачи для трансверсально-изотропных сред, вращающихся с постоянной угловой скоростью Ω, а также получение соотношений для описания влияния вращения на параметры поверхностных акустических волн (ПАВ), которые могут использоваться в гироскопах [7–9].

Исходные соотношения. Уравнение движения в перемещениях для монохроматических волн $\left(e^{-i\,\omega t}\right)$, содержащих массовые силы, по [10, 11] имеет вид:

$$-\omega^2 \rho u^i = \nabla_j C^{ijrs} \nabla_{(r} u_{s)} + F^i, \tag{1}$$

где F^i – вектор плотности объемных сил; ρ — плотность; ω — частота.

Для трансверсально-изотропных материалов тензор коэффициентов упругости C^{ijrs} может быть разложен на неприводимые части следующим образом [12]:

$$C^{ijrs} = C_1 g^{ij} g^{rs} + C_2 (g^{ir} g^{js} + g^{is} g^{jr}) + C_3 [(3n^i n^j - g^{ij}) g^{rs} + (3n^r n^s - g^{rs}) g^{ij}] +$$
$$+ C_4 \left[\left(3n^i n^r - g^{ir}\right) g^{js} + \left(3n^j n^s - g^{is}\right) g^{ir} + \left(3n^i n^s - g^{is}\right) g^{jr} + \left(3n^j n^r - g^{jr}\right) g^{ir}\right] +$$
$$+ C_5 \left(35 n^i n^j n^r n^s - 30 n^{(i} n^j g^{rs)}\right) + 3 g^{(ij} g^{rs)},$$

где n_i — единичный вектор главной оси симметрии;

$$C_1 = \frac{1}{3}\left(C_I^{\{4\}} + 2C_I^{\{22\}}\right); \quad C_2 = \frac{1}{3}\left(C_I^{\{4\}} - C_I^{\{22\}}\right); \tag{2}$$

$$C_3 = \frac{1}{12}\left(C_g^{\{4\}} + 2C_g^{\{22\}}\right); \quad C_4 = \frac{1}{12}\left(C_g^{\{4\}} - C_g^{\{22\}}\right); \quad C_5 = \frac{1}{8} C_n^{\{4\}}; \tag{3}$$

$$C_I^{\{4\}} = \frac{1}{15}\left(8C_{11} + 3C_{33} + 4C_{13} + 8C_{44}\right);$$

$$C_I^{\{22\}} = \frac{1}{6}\left(-C_{11} + 3C_{12} + 4C_{13} - 4C_{44}\right); \qquad C_g^{\{4\}} = \frac{2}{21}\left(-8C_{11} + 6C_{33} + 2C_{13} + 4C_{44}\right);$$

$$C_g^{\{22\}} = \frac{1}{3}\left(2C_{11} - 6C_{12} + 4C_{13} - 4C_{44}\right); \quad C_n^{\{4\}} = \frac{8}{35}\left(C_{11} + C_{33} - 2C_{13} - 4C_{44}\right). \tag{4}$$

Константы, входящие в коэффициенты разложения (4), являются элементами матрицы упругих постоянных, записанной по свернутому индексу.

Пренебрегая центробежными силами как малой величиной второго порядка, а также учитывая, что $\Omega = const$, представим массовые силы в виде сил Кориолиса. Тогда вектор плотности объемных сил можно записать следующим образом:

$$F^s = -i 2\omega^2 \rho \frac{1}{\omega} \varepsilon^{sjk} \Omega_j u_k, \tag{5}$$

где Ω_j — вектор угловой скорости, ε^{sjk} — дискриминантный тензор.

Для квазипродольных и квазипоперечных волн, учитывая работу [3] и принимая во внимание выражение (5), уравнения движения могут быть записаны в виде следующей системы:

$$\nabla^s \nabla_s \overset{(k)}{u}_J + \overset{(k)}{b_1} \overset{(k)}{u}_J + b_2 \nabla_J \nabla^s \overset{(k)}{u}_s = -\frac{i}{C_{44}} 2\omega^2 \rho \frac{1}{\omega} \varepsilon_{Jjs} \Omega^j \overset{(k)}{u^s}; \tag{6}$$

$$\nabla_\beta \nabla^\alpha \overset{(k)}{u}_\alpha + \overset{(k)}{b_3} \overset{(k)}{u}_\beta + b_4 \nabla_J \nabla_\beta \overset{(k)}{u}_J = -\frac{i}{C_{11}} 2\omega^2 \rho \frac{1}{\omega} \varepsilon_{\beta js} \Omega^j \overset{(k)}{u^s}. \tag{7}$$

http://vestnik.donstu.ru

Здесь:

$$\overset{(k)}{b_1} = \frac{1}{C_{44}}\left(\omega^2\rho - \overset{(k)}{h}{}^2\left(-C_{13} + C_{33} - 2C_{44}\right)\right);$$

$$b_2 = \frac{1}{C_{44}}\left(C_{13} + C_{44}\right); \quad \overset{(k)}{b_3} = \frac{1}{C_{11}}\left(\omega^2\rho - \overset{(k)}{h}{}^2 C_{44}\right); \quad b_4 = \frac{1}{C_{11}}\left(C_{13} + C_{44}\right); \tag{8}$$

$(k) = L, T,$ индекс L относится к квазипродольным волнам, а индекс T — к квазипоперечным; $\overset{(k)}{h}$ – проекция волнового вектора $\overset{(k)}{g}$ на ось материальной симметрии; индекс J — фиксированный, он соответствует главной оси симметрии материала, $\beta = K, N$; фиксированные индексы J, K, N относятся к локальному аффинному реперу $\bar{e}_J, \bar{e}_K, \bar{e}_N$, имеющему один инвариантный базисный вектор $\bar{e}_J$, когда справедливы уравнения (6) и (7).

Решаемая научная задача заключается в том, чтобы найти аналитическое решение уравнений (6), (7) для трансверсально-изотропного полупространства, вращающегося с постоянной скоростью.

Постановка задачи. Конкретизируем задачу рассмотрением плоских волн, распространяющихся в плоскости, перпендикулярной оси вращения.

Рассмотрим трансверсально-изотропное полупространство, граница которого представляет собой плоскость. Нормаль к границе составляет угол α с направлением оси симметрии полупространства.

Для описания волн в полупространстве введем соответствующую аффинному реперу $\bar{e}_J, \bar{e}_K, \bar{e}_N$ Декартову систему координат x^J, x^K, x^N, где ось x^J совпадает с осью симметрии материала полупространства, а ось x^K лежит в плоскости распространения волн. Вращение полупространства производится вокруг оси x^N с угловой скоростью Ω.

Направление распространения волн определяется волновым вектором $\overset{(K)}{g}$. Вектор $\overset{(K)}{g}$ составляет угол θ с осью x^J (рис.1).

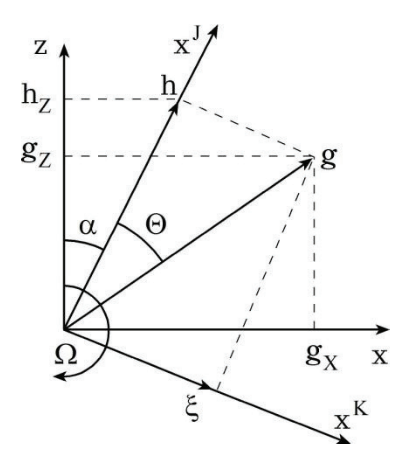


Рис. 1. Расчетная схема плоских волн, распространяющихся в плоскости, перпендикулярной оси вращения

Компоненты перемещений квазипродольных и квазипоперечных волн во вращающемся полупространстве являются решением уравнений движения (6), (7).

Компоненты напряжения могут быть определены из закона Гука:

$$\sigma^{ij} = C^{ijrs}\nabla_{(r}u_{s)}. \tag{9}$$

Поле также должно удовлетворять граничным условиям свободной поверхности полупространства.

Решение задачи.

Объемные волны. Используя метод скаляризации, запишем компоненты перемещений через скалярные потенциалы для квазипродольных волн φ и для квазипоперечных волн W, как это сделано в [3]:

$$u_i = \frac{\partial}{\partial x^i}\varphi + \frac{1}{g}\left(\delta_i^J g^2 + \frac{\partial^2}{\partial x^i \partial x^J}\right)W, \tag{10}$$

где δ_i^J – символ Кронекера.

Функции φ и W являются решениями уравнений Гельмгольца с собственными значениями $\overset{(K)}{g} = \omega / V_{(K)}$; $V_{(L)}$ и $V_{(T)}$ — скорости квазипродольных и квазипоперечных волн.

Представим решение уравнений Гельмгольца в виде плоских волн:

$$\varphi = \varphi_0 e^{i \overset{(L)}{h} x^J} e^{i \overset{(L)}{\xi} x^K} \quad W = W_0 e^{i \overset{(T)}{h} x^J} e^{i \overset{(T)}{\xi} x^K}, \tag{11}$$

где $\overset{(K)}{h}{}^2 + \overset{(K)}{\xi}{}^2 = \overset{(K)}{g}{}^2$.

Используя (10), из выражений (6) и (7) соответственно получим:

$$\beta_{11}\varphi + \beta_{12}W = 0; \quad \beta_{21}\varphi + \beta_{22}W = 0, \tag{12}$$

где:

$$\beta_{11} = i\overset{(L)}{h}\left[-\overset{(K)}{g}{}^2(1+b_2) + \overset{(K)}{b_1}\right] + \frac{\overset{(L)}{\xi}}{C_{44}} 2\omega^2\rho\frac{\Omega}{\omega}; \qquad \beta_{12} = \frac{\overset{(T)}{\xi}{}^2}{\overset{(K)}{g}}\left(\overset{(K)}{b_1} - \overset{(K)}{g}{}^2\right) + \frac{i}{C_{44}}\frac{\overset{(T)}{\xi}\overset{(T)}{h}}{\overset{(K)}{g}} 2\omega^2\rho\frac{\Omega}{\omega};$$

$$\beta_{21} = i\overset{(L)}{\xi}\left(\overset{(K)}{b_3} - \overset{(L)}{\xi}{}^2 - b_4\overset{(L)}{h}{}^2\right) - \frac{\overset{(L)}{h}}{C_{11}} 2\omega^2\rho\frac{\Omega}{\omega}; \qquad \beta_{22} = \frac{\overset{(T)}{h}{}^2\overset{(T)}{\xi}}{\overset{(K)}{g}}\left(\overset{(T)}{\xi}{}^2 - \overset{(K)}{b_3} - b_4\overset{(T)}{\xi}{}^2\right) + \frac{i}{C_{11}}\frac{\overset{(T)}{\xi}{}^2}{\overset{(K)}{g}} 2\omega^2\rho\frac{\Omega}{\omega}. \tag{13}$$

Приравнивая к нулю определитель системы уравнений (12), найдем соотношение для определения $\overset{(K)}{g}$. В результате получившееся уравнение отличается от аналогичного в [3, 11] наличием слагаемых, учитывающих вращение среды. Если вращение отсутствует $(\Omega = 0)$, то это соотношение совпадает с соответствующим уравнением для одноосных кристаллов [11].

Из выражения (12) следует соотношение $B = \varphi / W = -\beta_{12}/\beta_{11} = -\beta_{22}/\beta_{21}$, используя которое запишем формулу (10) для определения перемещений через скалярные потенциалы в форме, аналогичной [3]:

$$u_i = \left(\overset{(L)}{D_1}\frac{\partial}{\partial x^i} + \overset{(L)}{D_2}\frac{\partial}{\partial x^J}\delta_i^J\right)\varphi + \left(\frac{1}{\overset{(T)}{g}}\overset{(T)}{D_1}\frac{\partial^2}{\partial x^i \partial x^J} + \overset{(T)}{g}\delta_i^J\right)W; \tag{14}$$

$$\overset{(L)}{D_1} = 1 - \frac{\overset{(L)}{h}{}^2\left[\overset{(L)}{b_1} - \overset{(L)}{g}{}^2(1+b_2)\right] + i\frac{\overset{(L)}{h}\overset{(L)}{\xi}}{C_{44}}2\omega^2\rho\frac{\Omega}{\omega}}{\overset{(L)}{\xi}{}^2\left(b_1 - \overset{(L)}{g}{}^2\right) + i\overset{(L)}{\xi}\overset{(L)}{h}\frac{1}{C_{44}}2\omega^2\rho\frac{\Omega}{\omega}};$$

http://vestnik.donstu.ru

$$\overset{(L)}{D}_2 = \frac{i\overset{(L)}{\xi}\left(\overset{(L)}{\xi}{}^2 - \overset{(L)}{b}_3 - \overset{(L)}{\xi}{}^2 \overset{(L)}{b}_4\right) - \frac{1}{C_{44}}\frac{\overset{(L)}{\xi}{}^2}{\overset{(L)}{h}}2\omega^2\rho\frac{\Omega}{\omega}}{i\overset{(L)}{\xi}\left(\overset{(L)}{b}_3 - \overset{(L)}{\xi}{}^2 - \overset{(L)}{b}_4 \overset{(L)}{h}{}^2\right) - \frac{\overset{(L)}{h}}{C_{11}}2\omega^2\rho\frac{\Omega}{\omega}}; \qquad \overset{(T)}{D}_1 = 1 + \frac{i\frac{\overset{(T)}{\xi}{}^2}{\overset{(T)}{h}}\left(b_1 - \overset{(T)}{g}{}^2\right) - \frac{1}{C_{44}}\overset{(T)}{\xi}\,2\omega^2\rho\frac{\Omega}{\omega}}{i\overset{(T)}{h}\left[-\overset{(T)}{g}{}^2\left(1 + b_2\right) + b_1\right] + \frac{\overset{(T)}{\xi}}{C_{44}}2\omega^2\rho\frac{\Omega}{\omega}}. \tag{15}$$

Компоненты тензора напряжений находятся из закона Гука:

$$\sigma_{ij} = \left[\overset{(L)}{d}_1 \delta_{ij} + \overset{(L)}{d}_2 \delta_i^J \delta_j^J + \overset{(L)}{d}_3 \frac{1}{2}\left(\delta_i^J \frac{\partial^2}{\partial x^j \partial x^J} + \delta_j^J \frac{\partial^2}{\partial x^i \partial x^J}\right)\frac{\partial}{\partial x^J} + \overset{(L)}{d}_4 \frac{\partial^2}{\partial x^i \partial x^j}\right]\varphi +$$

$$+\left[\overset{(T)}{d}_1 \delta_{ij}\frac{\partial}{\partial x^J} + \overset{(T)}{d}_2 \delta_i^J \delta_j^J \frac{\partial}{\partial x^J} + \overset{(T)}{d}_3 \frac{1}{2}\left(\delta_i^J \frac{\partial}{\partial x^j} + \delta_j^J \frac{\partial}{\partial x^i}\right) + \overset{(T)}{d}_4 \frac{\partial^3}{\partial x^i \partial x^j \partial x^J}\right] W, \tag{16}$$

где в соответствии с [3] имеем:

$$\overset{(L)}{d}_1 = -\overset{(L)}{g}{}^2 a_1 + \overset{(L)}{h}{}^2 a_3\left(\overset{(L)}{D}_1 + \overset{(L)}{D}_2\right); \qquad \overset{(L)}{d}_2 = -\overset{(L)}{g}{}^2 a_3 - \overset{(L)}{h}{}^2\left(2a_4 \overset{(L)}{D}_2 + a_5 \overset{(L)}{D}_2 + a_5 \overset{(L)}{D}_1\right);$$

$$\overset{(L)}{d}_3 = 2a_2 \overset{(L)}{D}_2 + 2a_4\left(2\overset{(L)}{D}_1 + \overset{(L)}{D}_2\right); \qquad \overset{(L)}{d}_4 = 2a_2 \overset{(L)}{D}_1;$$

$$\overset{(T)}{d}_1 = a_1 \overset{(T)}{g}\left(1 - \overset{(T)}{D}_1\right) + a_3\left(\overset{(T)}{g} - \overset{(T)}{h}{}^2 \overset{(T)}{g}{}^{-1} \overset{(T)}{D}_1\right); \qquad \overset{(T)}{d}_2 = a_3 \overset{(T)}{g}\left(1 - \overset{(T)}{D}_1\right) + 2a_4 \overset{(T)}{g} + a_5\left(\overset{(T)}{g} - \overset{(T)}{h}{}^2 \overset{(T)}{g}{}^{-1} \overset{(T)}{D}_1\right);$$

$$\overset{(T)}{d}_3 = 2a_2 \overset{(T)}{g} + 2a_4\left(\overset{(T)}{g} - 2\overset{(T)}{h}{}^2 \overset{(T)}{g}{}^{-1} \overset{(T)}{D}_1\right); \qquad \overset{(T)}{d}_4 = 2a_2 \overset{(T)}{D}_1 \overset{(T)}{g}{}^{-1}; \tag{17}$$

$$a_1 = C_{12};\ a_2 = \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}); \qquad a_3 = -C_{12} + C_{13};$$

$$a_4 = \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) + C_{44}; \qquad a_5 = C_{11} + C_{33} - 2(C_{13} + 2C_{44}). \tag{18}$$

Таким образом, формулы (14) и (16) описывают тензорные поля перемещений и напряжений через скалярные потенциалы и могут использоваться при расчете параметров упругих волн, находящихся в поле сил Кориолиса. Заметим, что форма соотношений (14) и (16) совпадает с формулами для полей, записанных через скалярные потенциалы в [3]. Отличие заключается в значении коэффициентов (15), в которых есть слагаемые, учитывающие вращение.

Поверхностные волны. С целью удовлетворения граничным условиям для удобства введем связанную с границей декартову систему координат x, y, z, которая образуется поворотом системы координат x^J, x^K, x^N путем против часовой стрелки вокруг оси x^N на угол α (см. рис. 1). В этом случае уравнения преобразования имеют вид:

$$z = -x^K \sin\alpha + x^J \cos\alpha; \qquad x^K = x\cos\alpha - z\sin\alpha;$$

$$x = x^K \cos\alpha + x^J \sin\alpha; \qquad x^J = x\sin\alpha + z\cos\alpha;$$

$$y = x^N; \qquad x^N = y. \tag{19}$$

При этом ось z совпадает с нормалью к границе, а оси x, y направлены параллельно ей.

Компоненты полей в системе координат x, y, z могут быть выражены через компоненты в системе координат x^J, x^K, x^N следующим образом [13]:

$$u_z = \frac{\partial x^J}{\partial z}u_J + \frac{\partial x^K}{\partial z}u_K; \quad u_x = \frac{\partial x^J}{\partial x}u_J + \frac{\partial x^K}{\partial x}u_K;$$

$$\sigma_{zz}=\frac{\partial x^J}{\partial z}\frac{\partial x^m}{\partial z}\sigma_{Jm}+\frac{\partial x^K}{\partial z}\frac{\partial x^m}{\partial z}\sigma_{Km};\qquad \sigma_{zx}=\frac{\partial x^J}{\partial z}\frac{\partial x^m}{\partial x}\sigma_{Jm}+\frac{\partial x^K}{\partial z}\frac{\partial x^m}{\partial x}\sigma_{Km}. \quad (20)$$

Зависимости проекций h, ξ волнового вектора g на оси координат x^J, x^K, x^N и проекции этого вектора на оси координат x, y, z выглядят так:

$$h=\frac{cos\theta}{sin(\alpha+\theta)}g_x=\frac{cos\,\theta}{cos(\alpha+\theta)}g_z;\qquad \xi=\frac{sin\theta}{sin(\alpha+\theta)}g_x=\frac{sin\theta}{cos(\alpha+\theta)}g_z;$$

$$g^2=h^2+\xi^2=g_z^2+g_x^2. \quad (21)$$

Используя выражения (19)–(21) из соотношений (14), (16) и (20), после несложных преобразований получим формулы для описания полей в системе координат x, y, z:

$$u_z=i\overset{(L)}{g}_z\left(\overset{(L)}{D}_1+\frac{cos\,\theta\, cos\,\alpha}{cos(\alpha+\theta)}\overset{(L)}{D}_2\right)\overline{\varphi}+i\overset{(T)}{g}_z\left(-cos\,\theta\,\overset{(T)}{D}_1+\frac{cos\,\alpha}{cos(\alpha+\theta)}\right)\frac{\overset{(T)}{g}}{\overset{(T)}{\xi}}\overline{W}; \quad (22)$$

$$u_x=i\overset{(L)}{g}_z\left(\frac{cos\,\theta\, cos\,\alpha}{cos(\alpha+\theta)}\left(\overset{(L)}{D}_1+\overset{(L)}{D}_2\right)+\frac{sin\theta\, cos\,\alpha}{cos(\alpha+\theta)}\overset{(L)}{D}_1\right)\overline{\varphi}+i\frac{\overset{(T)}{g}}{\overset{(T)}{\xi}}\overset{(T)}{g}_z\left(-\frac{sin(\alpha+\theta)cos\,\theta}{cos(\alpha+\theta)}\overset{(T)}{D}_1+\frac{sin\,\alpha}{cos(\alpha+\theta)}\right)\overline{W}; \quad (23)$$

$$\sigma_{zz}=\left\{cos^2\alpha\left[\overset{(L)}{d}_1+\overset{(L)}{d}_2-\left(\overset{(L)}{d}_3+\overset{(L)}{d}_4\right)\frac{cos^2\theta}{cos^2(\alpha+\theta)}\overset{(L)}{g}{}_z^2\right]+sin2\alpha\left(\frac{1}{2}\overset{(L)}{d}_3+\overset{(L)}{d}_4\right)\frac{sin2\theta}{2cos^2(\alpha+\theta)}\overset{(L)}{g}{}_z^2+\right.$$

$$\left.+sin^2\alpha\left(\overset{(L)}{d}_1-\overset{(L)}{d}_4\frac{sin^2\theta}{cos^2(\alpha+\theta)}\overset{(L)}{g}{}_z^2\right)\right\}\overline{\varphi}-\frac{\overset{(T)}{g}}{\xi}\left\{cos^2\alpha\frac{cos\,\theta}{cos(\alpha+\theta)}\overset{(T)}{g}_Z\left(\overset{(T)}{d}_1+\overset{(T)}{d}_2+\overset{(T)}{d}_3-\overset{(T)}{d}_4\frac{cos^2\theta}{cos^2(\alpha+\theta)}\overset{(T)}{g}{}_z^2\right)-\right.$$

$$\left.-sin2\alpha\frac{sin\theta g_z}{cos(\alpha+\theta)}\left(\frac{1}{2}\overset{(T)}{d}_3-\overset{(T)}{d}_4\frac{cos^2\theta}{cos^2(\alpha+\theta)}\overset{(T)}{g}{}_z^2\right)+sin^2\alpha\frac{cos\,\theta\,\overset{(T)}{g}_z}{cos(\alpha+\theta)}\left(\overset{(T)}{d}_1-\overset{(T)}{d}_4\frac{sin^2\theta}{cos^2(\alpha+\theta)}\overset{(T)}{g}{}_z^2\right)\right\}\overline{W}; \quad (24)$$

$$\sigma_{zx}=\left\{\frac{1}{2}sin2\alpha\left[\overset{(L)}{d}_2-\left(\overset{(L)}{d}_3+\overset{(L)}{d}_4\right)\frac{cos^2\theta}{cos^2(\alpha+\theta)}\overset{(L)}{g}{}_z^2+\overset{(L)}{d}_4\frac{sin^2\theta}{cos^2(\alpha+\theta)}\overset{(L)}{g}{}_z^2\right]-\left(1-2sin^2\alpha\right)\left(\frac{1}{2}\overset{(L)}{d}_3+\overset{(L)}{d}_4\right)\times\right.$$

$$\left.\times\frac{sin2\theta}{2cos^2(\alpha+\theta)}\overset{(L)}{g}{}_z^2\right\}\overline{\varphi}-\frac{\overset{(T)}{g}}{\xi}\left\{\frac{1}{2}sin2\alpha\frac{cos\,\theta}{cos(\alpha+\theta)}\overset{(T)}{g}_z\left(\overset{(T)}{d}_2+\overset{(T)}{d}_3-\overset{(T)}{d}_4\frac{cos\,2\theta}{cos^2(\alpha+\theta)}\overset{(T)}{g}{}_z^2\right)+\right.$$

$$\left.+\left(1-2sin^2\alpha\right)\frac{sin\theta}{cos(\alpha+\theta)}\overset{(T)}{g}_z\left(\frac{1}{2}\overset{(T)}{d}_3-\overset{(T)}{d}_4\frac{cos^2\theta}{cos^2(\alpha+\theta)}\overset{(T)}{g}{}_z^2\right)\right\}\overline{W}. \quad (25)$$

Здесь $\overline{\varphi}=\varphi_0 e^{i\overset{(L)}{g}_z z}e^{i\overset{(L)}{g}_x x}$; $\overline{W}=W_0 e^{i\overset{(T)}{g}_z z}e^{i\overset{(T)}{g}_x x}$.

Таким образом, найдены выражения для компонентов полей, которые входят в граничные условия.

Так как в полупространстве существуют падающие и отраженные волны, а в силу закона Снеллиуса $\overset{(L)}{g}_x=\overset{(T)}{g}_x=g$, функции $\overline{\varphi}$ и $\overline{W}$ могут быть записаны в виде:

$$\overline{\varphi}=\left(\varphi^+e^{i\overset{(L)}{g}_z z}+\varphi^-e^{-i\overset{(L)}{g}_z z}\right)e^{ig_x x}e^{-i\omega t};$$

$$\overline{W}=\left(W^+e^{i\overset{(T)}{g}_z z}+W^-e^{-i\overset{(T)}{g}_z z}\right)e^{ig_x x}e^{-i\omega t}. \quad (26)$$

http://vestnik.donstu.ru

Здесь $\varphi^{\pm}, W^{\pm}$ — амплитуды, подлежащие определению из граничных условий.

Для удобства дальнейшего изложения представим компоненты перемещений u_i и напряжений σ_{ij}, входящие в граничные условия, в виде вектор-столбца:

$$B = \left(u_z, u_x, \sigma_{zz}, \sigma_{zx}\right)^T = \left(u, \sigma\right)^T. \quad (27)$$

Для определения этих компонентов запишем следующее матричное соотношение:

$$B = CF\Psi, \quad (28)$$

где:

$$C = \begin{pmatrix} C_{(1)} & C_{(2)} \\ C_{(3)} & C_{(4)} \end{pmatrix}; \quad F = \begin{pmatrix} F^+ & 0 \\ 0 & F^- \end{pmatrix}; \quad \Psi = \begin{pmatrix} \Psi^+ \\ \Psi^- \end{pmatrix}; \quad F^+ = \begin{pmatrix} e^{i\overset{(L)}{g_z} z} & 0 \\ 0 & e^{i\overset{(T)}{g_z} z} \end{pmatrix};$$

$$F^- = \begin{pmatrix} e^{-i\overset{(L)}{g_z} z} & 0 \\ 0 & e^{-i\overset{(T)}{g_z} z} \end{pmatrix}; \quad \Psi^+ = \begin{pmatrix} \varphi^+ \\ W^+ \end{pmatrix}; \quad \Psi^- = \begin{pmatrix} \varphi^- \\ W^- \end{pmatrix}; \quad C_{(1)} = \begin{pmatrix} C_{(11)} & C_{(12)} \\ C_{(21)} & C_{(22)} \end{pmatrix};$$

$$C_{(3)} = \begin{pmatrix} C_{(31)} & C_{(32)} \\ C_{(41)} & C_{(42)} \end{pmatrix}.$$

Здесь опущены фазовый и временной множители $e^{ig_x x}, e^{-i\omega t}$.

Блоки $C_{(2)}$ и $C_{(4)}$ совпадают соответственно с $C_{(1)}$ и $C_{(3)}$, если у элементов главной диагонали матрицы $C_{(1)}$ и побочной диагонали матрицы $C_{(3)}$ изменить знаки на противоположные.

Элементы $C_{(ij)}$ матрицы C определяются из формул (22)–(25). Они представляют собой выражения, которые являются множителями, стоящими в формулах (22)–(25) перед функциями $\overline{\varphi}$ и $\overline{W}$. Например, элемент $C_{(11)}$ — это множитель перед $\overline{\varphi}$ в формуле (22), элемент $C_{(12)}$ — множитель перед $\overline{W}$ в этой формуле, элемент $C_{(21)}$ — множитель перед $\overline{\varphi}$ в формуле (23) и т. д.

Зная значения элементов матрицы С, можно для различных материалов определить параметры волны в зависимости от вращения Ω полупространства, а также от углов α и θ.

Граничные условия в данных обозначениях запишутся так:

$$B = \begin{pmatrix} u \\ 0 \end{pmatrix}, \text{ при } z = 0. \quad (29)$$

Компоненты вектор-столбца Ψ представляют собой амплитуды падающих и отраженных полей в полупространстве. Если представить падающее поле в виде продольной волны с единичной амплитудой, то отраженное поле будет определяться коэффициентами отражения $\Gamma_{\varphi\varphi}$, $\Gamma_{\varphi W}$ и вектор-столбец $\Psi = \left(1, 0, \Gamma_{\varphi\varphi}, \Gamma_{\varphi W}\right)^T$. При падающей поперечной волне единичной амплитуды $\Psi = \left(0, 1, \Gamma_{W\varphi}, \Gamma_{WW}\right)^T$. Подставляя эти значения Ψ в соотношение (28) и учитывая, что напряжение на свободной поверхности равно 0 (29), можно найти формулы для компонентов Γ. Совокупность этих формул запишем в виде выражения для матрицы Γ следующим образом:

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \Gamma_{\varphi\varphi} & \Gamma_{W\varphi} \\ \Gamma_{\varphi W} & \Gamma_{WW} \end{pmatrix} = -C_{(4)}^{-1} C_{(3)} = -\frac{1}{\Delta_1} \begin{pmatrix} C_{(42)}C_{(31)} + C_{(32)}C_{(41)} & 2C_{(42)}C_{(32)} \\ 2C_{(41)}C_{(31)} & C_{(41)}C_{(32)} + C_{(31)}C_{(42)} \end{pmatrix}; \quad (30)$$

$$\Delta_1 = C_{(33)}C_{(44)} - C_{(43)}C_{(34)}. \quad (31)$$

Для определения скорости распространения ПАВ вдоль свободной границы достаточно приравнять к нулю определитель Δ_1 (31) и решить получившееся уравнение относительно $g_x = \omega / V_R$, где $V_R -$ скорость ПАВ.

Компоненты перемещений для волн, распространяющихся в приграничном слое, могут быть найдены из выражений:

$$u_z = A_0\left(C_{(11)}C_{(42)}e^{i\overset{(L)}{g_z}z} - C_{(12)}C_{(41)}e^{i\overset{(L)}{g_z}z}\right)e^{ig_x x}e^{-i\omega t};$$

$$u_x = A_0\left(C_{(21)}C_{(42)}e^{i\overset{(L)}{g_z}z} - C_{(22)}C_{(41)}e^{i\overset{(L)}{g_z}z}\right)e^{ig_x x}e^{-i\omega t}. \quad (32)$$

Для поверхностных волн, когда они убывают при удалении от границы, величины g_z являются мнимыми $\overset{(L)}{g_z} = i\overset{(L)}{\alpha_z}$, $\overset{(T)}{g_z} = i\overset{(T)}{\alpha_z}$, и вещественные значения u_z и u_x описывают траекторию частиц, участвующих в переносе ПАВ.

Таким образом, полученные соотношения позволяют исследовать влияние вращения на параметры ПАВ в трансверсально-изотропном полупространстве. Для этого достаточно найти коэффициенты C_{ij} из выражений (22)–(25), где $\overset{(K)}{g}$ определяются из (12) при $\Delta = 0$. Далее по формуле (31) при $\Delta_1 = 0$ вычислить фазовую скорость и, следовательно, частоту ПАВ. Затем, используя (32), можно определить изменение амплитуды колебаний частиц, участвующих в переносе ПАВ, а также форму эллиптической траектории движения частиц.

Изотропные среды. В качестве примера рассмотрим изменение параметров ПАВ в изотропном вращающемся полупространстве.

В изотропном случае имеем:

$$C_{11} = C_{33} = \lambda + 2\mu; \quad C_{13} = -C_{12} = \lambda; \quad C_{44} = \mu;$$

$$a_1 = \lambda; \quad a_2 = \mu; \quad a_3 = a_4 = a_5 = 0;$$

$$\overset{(L)}{d_1} = -\lambda q \chi^2; \quad \overset{(L)}{d_2} = 0; \quad \overset{(L)}{d_3} = 2\mu R_2^*;$$

$$\overset{(L)}{d_4} = 2\mu\left(1 - R_3^*\right); \quad \overset{(T)}{d_1} = -\lambda q R_1^*; \quad \overset{(T)}{d_2} = 0;$$

$$\overset{(T)}{d_3} = 2\mu\chi; \quad \overset{(T)}{d_4} = 2\mu\frac{1}{\chi}\left(1 + R_1^*\right). \quad (33)$$

Здесь $\overset{(L)}{D_1} = 1 + R_3^*$; $\overset{(L)}{D_2} = R_2^*$; $\overset{(T)}{D_1} = 1 + R_1^*$; $R_1^* \cong \dfrac{-2}{\sqrt{1 - \dfrac{1}{S}\left(1 - \dfrac{1}{q}\right)}}\dfrac{\Omega}{\omega}$; $R_2^* \cong \dfrac{-2\sqrt{\dfrac{q}{S}}}{\sqrt{\dfrac{S}{q} - 1}\left(1 - q\right)}\dfrac{\Omega}{\omega}$; $R_3^* \cong \dfrac{\sqrt{1 - \dfrac{q}{S}}}{\sqrt{(1 - q)}}\dfrac{\Omega}{\omega}$.

Малой величиной второго порядка $\left(\dfrac{\Omega}{\omega}\right)^2$ пренебрегли.

$$\overset{(K)}{b_1} = \overset{(L)}{b_1} = \overset{(T)}{b_1} = \frac{\omega^2\rho}{\mu}; \; b_2 = \frac{\lambda + \mu}{\mu}; \; \overset{(K)}{b_3} = \frac{\omega^2\rho - h^2\mu}{\lambda + 2\mu}; \; b_4 = \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu}; \quad (34)$$

λ, μ — упругие константы Ламе.

Элементы матрицы C имеют вид:

$$C_{(11)} = i\left(R_2^* - R_3^*\right)\chi\sqrt{q - S} + i\chi\sqrt{q - S}; \qquad C_{(12)} = -\frac{i}{\sqrt{S}}\left[\chi S - \chi(1 - S)R_1^*\right];$$

$$C_{(21)} = -i\chi\sqrt{S}R_3^* + i\chi\sqrt{S}\,;\; C_{(22)} = i\left(\chi\sqrt{1-S} + \chi\sqrt{1-S}R_1^*\right);$$

$$C_{(31)} = -\mu\chi^2(1-2S) - 2\mu\chi^2(q-S)\left(R_2^* - R_3^*\right);$$

$$C_{(32)} = -\frac{1}{\sqrt{S}}\left(\mu\chi^2\left(\frac{1}{q} - 2S\right)\sqrt{1-S}R_1^* - 2\mu\chi^2 S\sqrt{1-S}\right);$$

$$C_{(41)} = -\chi^2\sqrt{q-S}\sqrt{S}\,2\mu\left(1 + \frac{1}{2}R_2^*\right) + \chi^2\sqrt{q-S}\sqrt{S}\,2\mu R_3^*;$$

$$C_{(42)} = -\chi^2(1-S)2\mu R_1^* + \chi^2 2\mu\left(S - \frac{1}{2}\right). \tag{35}$$

Здесь $q = \frac{K^2}{\chi^2}$; $S = \frac{g_x^2}{\chi^2}$; $k = \frac{\omega}{v_l}$; $\chi = \frac{\omega}{v_t}$; $g_x = \frac{\omega}{v_R}$; $v_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$; $v_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$; v_l — скорость продольных волн; v_t — скорость поперечных волн; v_R — скорость ПАВ.

Скорость распространения ПАВ определяется при $\Delta_1 = 0$ из уравнения (31), которое в явном виде выглядит следующим образом:

$$\left[(1-2S)^2 + 4S\sqrt{q-S}\sqrt{1-S}\right] + 2\left[(1-2S)(1-S) - \sqrt{q-S}\sqrt{1-S}\left(\frac{1}{q} - 2S\right)\right]R_1^* +$$

$$+2\left[(1-2S)(q-S) + S\sqrt{1-S}\sqrt{q-S}\right]R_2^* - 2\left[(1-2S)(q-S) + 2S\sqrt{1-S}\sqrt{q-S}\right]R_3^* = 0\,, \tag{36}$$

где необходимо брать вещественные корни.

Это уравнение отличается от известного [14] наличием слагаемых, учитывающих вращение полупространства. Определив из уравнения (36) величину S при заданных q и $\frac{\Omega}{\omega}$, можно использовать формулы (35) для нахождения компонентов поля (27).

Для волн, распространяющихся в приграничном слое, эти компоненты могут быть записаны в виде:

$$u_z = C_{(11)}\varphi^+ e^{i\overset{(L)}{g_z}z} + C_{(12)}W^+ e^{i\overset{(T)}{g_z}z};$$

$$u_x = C_{(21)}\varphi^+ e^{i\overset{(L)}{g_z}z} + C_{(22)}W^+ e^{i\overset{(T)}{g_z}z}; \tag{37}$$

$$\sigma_{zz} = C_{(31)}\varphi^+ e^{i\overset{(L)}{g_z}z} + C_{(32)}W^+ e^{i\overset{(T)}{g_z}z};$$

$$\sigma_{zx} = C_{(41)}\varphi^+ e^{i\overset{(L)}{g_z}z} + C_{(42)}W^+ e^{i\overset{(T)}{g_z}z}. \tag{38}$$

Найдем амплитуды потенциалов φ^+ и W^+. Для этого предположим, что источники в виде давления расположены на границе. Тогда, используя граничные условия, можно решить систему уравнений (38) и, подставив решение в (37), получим выражение для компонентов перемещений. Восстанавливая множитель $e^{-i\omega t}e^{ig_x x}$, имеем:

$$u_z = A_0\left(C_{(11)}C_{(42)}e^{i\overset{(L)}{g_z}z} - C_{(12)}C_{(41)}e^{i\overset{(T)}{g_z}z}\right)e^{-i\omega t}e^{ig_x x};$$

$$u_x = A_0\left(C_{(21)}C_{(42)}e^{i\overset{(L)}{g_z}z} - C_{(22)}C_{(41)}e^{i\overset{(T)}{g_z}z}\right)e^{-i\omega t}e^{ig_x x}. \tag{39}$$

Для поверхностных волн, когда волны убывают при удалении от границы, величины g_z являются мнимыми $\overset{(L)}{g_z} = i\overset{(L)}{\alpha}$, $\overset{(T)}{g_z} = i\overset{(T)}{\alpha}$ и вещественные значения u_z и u_x описывают траекторию частиц, участвующих в переносе ПАВ.

Движение частиц вблизи поверхности может быть найдено из (39) при $z=0$ и после подстановки элементов матрицы $C_{(ij)}$ из (35) определяется следующими формулами:

$$u_z = A\frac{1}{2}\sqrt{s-q}\left[-1+(s-1)R_2^* + R_3^*\right]sin(g_x x - \omega t);$$

$$u_x = A\sqrt{s}\Big[0{,}5 - s + \sqrt{s-1}\sqrt{s-q} + \left(1 - s + \sqrt{s-1}\sqrt{s-q}\right)R_1^* + \left(s - 0{,}5 - \sqrt{s-1}\sqrt{s-q}\right)R_3^* +$$

$$+ 0{,}5\sqrt{s-1}\sqrt{s-q}R_2^*\Big]cos(g_x x - \omega t). \quad (40)$$

Здесь s находится из уравнения (36).

Из этих формул видно, что траектория смещения частиц в поверхностной волне представляет собой эллипс, оси которого зависят от скорости вращения различным образом.

Численное моделирование и анализ его результатов. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведен график, соответствующий зависимости скорости распространения ПАВ $S = \frac{v_t^2}{v_R^2}$ от скорости вращения полупространства $w = \frac{\Omega}{\omega}$ при $q = 0{,}33$.

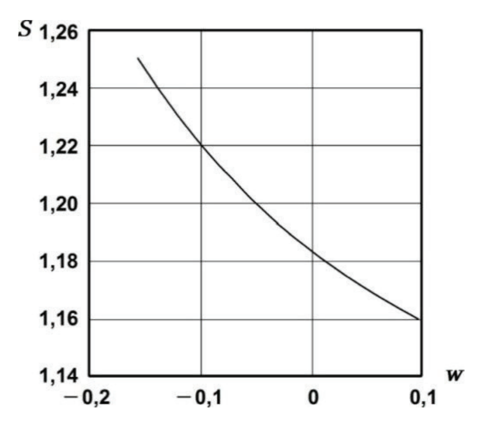


Рис. 2. График зависимости скорости распространения ПАВ от скорости вращения полупространства

Как видно из данного графика, фазовая скорость увеличивается или уменьшается в зависимости от направления вращения Ω полупространства. При малом вращении эта зависимость имеет почти линейный характер.

На рис. 3 приведены траектории движения частиц на поверхности при $w=0,$ $w=0{,}01,$ $w=0{,}02$ и $w=0{,}08$ соответственно для $q=0{,}33$.

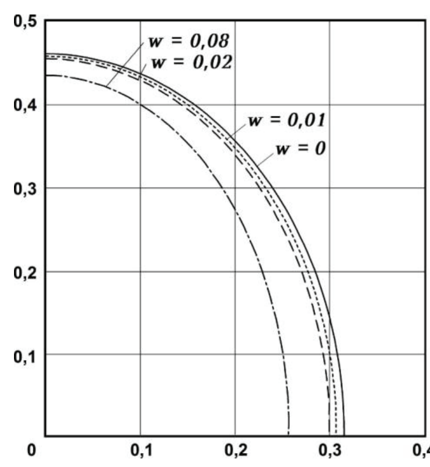


Рис. 3. Траектории движения частиц на поверхности при различных скоростях вращения полупространства

Как видно, траектория движения частиц вблизи поверхности изменяется при вращении полупространства. Причем малая ось эллипса изменяется в большей степени, чем большая.

Вывод. Таким образом, с помощью метода скаляризации найдено аналитическое решение задачи исследования параметров ПАВ при вращении трансверсально-изотропного полупространства. Кроме того, приведены соотношения для расчета фазовой скорости (и, следовательно, частоты ПАВ), а также амплитуды и формы движения частиц, участвующих в переносе ПАВ. Все эти факторы могут использоваться при конструировании гироскопов на акустических волнах.

Библиографический список

1. Фельсен, Л. Излучение и рассеяние волн / Л. Фельсен, Н. Маркуш. — Москва : Мир, 1978. — Т. 1. — 547 с.
2. Морс, Ф. М. Методы теоретической физики / Ф. М. Морс, Г. Фешбах. — Москва : Издательство иностранной литературы, 1960. — Т. 2. — 896 с.
3. Сизов, В. П. О скаляризации динамических упругих полей в трансверсально-изотропных средах / В. П. Сизов // Известия РАН. Механика твердого тела. — 1988. — № 5. — С. 55–58.
4. Петров, А. М. Определение напряженно-деформированного состояния в многослойной цилиндрической трубе при динамических нагрузках / А. М. Петров, В. П. Сизов // Известия РАН. Механика твердого тела. — 1994. — № 5. — С. 69–75.
5. Мирошниченко, И. П. Определение напряженно-деформированного состояния в слоистой цилиндрической конструкции при многократном воздействии локальных динамических нагрузок / И. П. Мирошниченко, В. П. Сизов // Известия РАН. Механика твердого тела. — 2000. — № 1. — С. 97–104.
6. Петров, А. М. Динамическое поведение анизотропных многослойных цилиндрических конструкций / А. М. Петров, В. П. Сизов // Известия РАН. Механика твердого тела. — 2000. — № 3. — С. 34–39.
7. Микроакустомеханический гироскоп : патент 2543706 Рос. Федерация : МПК G 01 C 19/56, H 03 H 9/25 / Ю. В. Вахтин [и др.]. — № 2013143420/28 ; заявл. 25.09.2013 ; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 7. — 8 с.
8. Гироскоп на поверхностных акустических волнах : патент 2390727 Рос. Федерация / В. А. Калинин [и др.]. — № 2009109734/28 ; заявл. 17.03.2009 ; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15. — 8 с.
9. Apparatus and method for detecting a rotation : patent 7895892 B2 US / R. Aigner. — 01.03.2011.
10. Новацкий В. Теория упругости / В. Новацкий. — Москва : Мир, 1975. — 872 с.
11. Федоров, Ф. И. Теория упругих волн в кристаллах / Ф. И. Федоров. — Москва : Наука, 1965. — 386 с.
12. Сиротин, Ю. И. Основы кристаллографии / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. — Москва : Наука, 1975. — 680 с.
13. Рашевский, П. К. Риманова геометрия и тензорный анализ / П. К. Рашевский. — Москва : Наука, 1967. — 664 с.
14. Бреховских, Л. М. Волны в слоистых средах / Л. М. Бреховских. — Москва : АН СССР, 1957. — 502 с.

References

1. Felsen, L., Marcush, N. Izluchenie i rasseyanie voln. [Radiation and scattering of waves.] Moscow: Mir, 1978, vol. 1, 547 p. (in Russian).
2. Morse, F.-M., Feshbach, H. Metody teoreticheskoy fiziki. [Methods of Theoretical Physics.] Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1960, vol. 2, 896 p. (in Russian).
3. Sizov, V.P. O skalyarizatsii dinamicheskikh uprugikh poley v transversal'no-izotropnykh sredakh. [On scalarization of dynamic elastic fields in transversely isotropic media.] Izvestia: Mechanics of Solids, 1988, no. 5, pp. 55–58 (in Russian).
4. Petrov, A.M., Sizov, V.P. Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v mnogosloynoy tsilindricheskoy trube pri dinamicheskikh nagruzkakh. [Determination of stress-strain state in a multi-cylindrical tube under dynamic loads.] Izvestia: Mechanics of Solids, 1994, no. 5, pp. 69–75 (in Russian).
5. Miroshnichenko, I.P., Sizov, V.P. Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v sloistoy tsilindricheskoy konstruktsii pri mnogokratnom vozdeystvii lokal'nykh dinamicheskikh nagruzok. [Determination of stress-strain state in a layered cylindrical structure under local dynamic loading.] Izvestia: Mechanics of Solids, 2000, no. 1, pp. 97–104 (in Russian).

6. Petrov, A.M., Sizov, V.P Dinamicheskoe povedenie anizotropnykh mnogosloynykh tsilindricheskikh konstruktsiy. [Dynamic behavior of anisotropic multilayered cylindrical structures.] Izvestia: Mechanics of Solids, 2000, no. 3, pp. 34–39 (in Russian).

7. Vakhtin, Y.V., et al. Mikroakustomekhanicheskiy giroskop: patent 2543706 Ros. Federatsiya: MPK G 01 C 19/56, H 03 H 9/25. [Microacoustomehanichal gyroscope.] RF Patent no. 2543706, 2015 (in Russian).

8. Kalinin, V.A., et al. Giroskop na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh: patent 2390727 Ros. Federatsiya. [Acoustic-surface-wave gyroscope.] RF Patent no. 2390727, 2010 (in Russian).

9. Aigner, R. Apparatus and method for detecting a rotation: patent 7895892 B2 US, 01.03.2011.

10. Novatsky, V. Teoriya uprugosti. [Elasticity theory.] Moscow: Mir, 1975, 872 p. (in Russian).

11. Fedorov, F.I. Teoriya uprugikh voln v kristallakh. [Elastic wave theory in crystals.] Moscow: Nauka, 1965, 386 p. (in Russian).

12. Sirotin, Y.I., Shaskolskaya, M.P. Osnovy kristallografii. [Basic crystallography.] Moscow: Nauka, 1975, 680 p. (in Russian).

13. Rashevskiy, P.K. Rimanova geometriya i tenzornyy analiz. [Riemann geometry and tensor analysis.] Moscow: Nauka, 1967, 664 p. (in Russian).

14. Brekhovskikh, L.M. Volny v sloistykh sredakh. [Waves in layered media.] Moscow: AN SSSR, 1957, 502 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 23.04.2015
Сдана в редакцию 23.04.2015
Запланирована в номер 30.06.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.792; 621.793.7 DOI 10.12737/12590

Ресурсосберегающие технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий высокоскоростными методами нанесения*

И. Н. Кравченко[1], М. Ю. Карелина[2], Е. М. Зубрилина[3], А. А. Коломейченко[4]**

[1, 4] Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация
[2] Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, Российская Федерация
[3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Resource-saving technologies of derivatization of functional nanostructured coatings by high-speed application methods ***

I. N. Kravchenko[1], M. Y. Karelina[2], E. M. Zubrilina[3], A. A. Kolomeychenko[4]**

[1, 4] Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation
[2] Moscow Automobile and Road Construction University (MADI), Moscow, Russian Federation
[3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель работы заключается в поиске новых, основанных на ресурсосберегающих технологиях, методов нанесения наноструктурированных покрытий различного функционального назначения. Главной задачей является исследование современных эффективных методов повышения прочности, коррозионной и износостойкости. В качестве предмета исследования выступают высокоскоростные способы нанесения антикоррозионных и износостойких покрытий, позволяющие значительно повысить долговечность и надежность изделий. Описаны конструктивные, технологические особенности, технические характеристики и сферы применения различных моделей установок для высокоскоростных способов напыления, в частности газопламенного. Приведены результаты анализа основных физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий, полученных с использованием компактного высокопроизводительного технологического оборудования. В результате проведенной работы доказано, что покрытия, полученные высокоскоростными методами, в отличие от дозвуковых способов, отличаются высокими эксплуатационными характеристиками. В работе также представлены перспективные направления развития технологических методов нанесения многофункциональных покрытий, совершенствования оборудования и применяемых материалов. Полученные данные могут быть использованы при проектировании технологических процессов нанесения плотных покрытий стабильного качества на изделия сложной формы, изготовленные практически из любых металлов и сплавов. Результаты работы применимы в машиностроении, ремонтном производстве, авиации, энергетике и пр.

Ключевые слова: адгезия, высокоскоростное напыление, газотермические способы, износ, микроструктура, наноструктурированные покрытия, технология, твердость, установка.

The work objective is to study new application methods based on the resource-saving technologies for nanostructured coatings with different functionality. The main task of the work is investigating modern efficient methods to increase strength, corrosion resistance, and wearability. The subject of study is high-speed application methods for anti-corrosion and wear-resistant coatings that significantly improve the durability and reliability of products. Design, technological features, specifications, and a scope of applicability of various installation models for high-speed deposition methods, including a gas-plasma technique, are described. The analysis results of the basic physical, mechanical and performance properties of the coatings obtained with the compact high-performance process equipment are presented. As a result of this work, it is shown that coatings obtained by the high-speed methods, unlike the subsonic methods, are characterized by the high performance. The paper also presents perspectives for development of the processing methods of the multifunctional coating application, the improvement of equipment and materials. The data obtained can be used for designing processes of applying dense coatings of consistent quality on the complex products made from nearly all metals and alloys. The results obtained are applicable in the mechanical engineering, repair production, aviation, energy engineering, etc.

Keywords: adhesion, high-speed plating, gas-thermal methods, wear, microstructure, nanostructured coatings, technology, hardness, installation.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИОКР.
**E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru, karelinamu@mail.ru, elena-zubrilina@rambler.ru, kolom.anastasiya@gmail.com
***The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. Газотермические способы напыления покрытий в России активно развиваются с конца пятидесятых годов XX века. В то время в ремонтном производстве и промышленности необходимо было решить ряд проблем, в частности, таких, как:
— упрочнение деталей машин,
— нанесение защитных и толстослойных покрытий, способных компенсировать износ деталей,
— получение новых материалов [1, 2, 3].

Современные способы газотермического напыления можно разделить на две основные группы: обычное (дозвуковое) и сверхзвуковое напыление.

Сверхзвуковое газопламенное напыление (СГПН) — это новый способ, базирующийся на непрерывном сжигании горючего газа с кислородом с целью получения высокоскоростной (сверхзвуковой) струи на выходе из горелки. Порошок вводится в газовый поток, которым он нагревается, ускоряется (обычно более 5 скоростей звука) и направляется на обрабатываемую деталь. Рабочий процесс в сверхзвуковой напылительной горелке аналогичен рабочему процессу в ракетном двигателе [4, 5, 6].

СГПН основано на использовании сверхзвуковых струй продуктов сгорания углеводородных топлив [7]. Топлива сжигаются в горелках при повышенных давлениях, обеспечивающих критический перепад давлений на сверхзвуковых соплах. Этот метод отличается от традиционного газопламенного напыления, при котором топливо сжигается во внешнем факеле при атмосферном давлении.

Высокоскоростное ГПН по праву считается наиболее современной технологией напыления. В странах Европы и Северной Америки во многих отраслях она практически вытеснила гальванику и методы вакуумного напыления. Нанесенные методами высокоскоростного напыления твердосплавные покрытия значительно превосходят гальванические, процесс создания которых является чрезвычайно канцерогенным.

Процесс высокоскоростного газопламенного напыления был изобретен в 1958 году в компании «Юнион Карбайд» (Union Carbide). Однако первое его применение относится к 1980-м годам и связано с изобретением Джеймсом Браунингом (США) установки для высокоскоростного напыления. Соответствующие лицензии были переданы «Кабот Корпорэйшн» (Cabot Corporation), затем «Делоро Стеллит» (Deloro Stellite), чья Jet Cote стала первой распространенной установкой. Вслед за этим многие компании предложили собственные версии оборудования: Diamond Jet от Sulzer Metco, JP-5000 от TAFA, K2 от GTV. Это способствовало быстрому распространению технологии. В 1992 году Дж. Браунинг запатентовал также метод HVAF — более дешевую альтернативу HVOF [8].

Таким образом, существуют два вида высокоскоростного газопламенного напыления, различающиеся природой применяемого для сжигания топлива и окислителя: высокоскоростное воздушно-топливное напыление и высокоскоростное кислородно-топливное напыление.

Анализ высокоскоростных способов нанесения функциональных покрытий. Высокоскоростное воздушно-топливное напыление (ВВТН). В англоязычной литературе используется термин HVAF-spaying (аббревиатура от High Velocity Air Fuel). Метод основан на разгоне и нагреве частиц напыляемого материала в высокотемпературном высокоскоростном потоке продуктов сгорания углеводородного топлива. Процесс происходит в сжатом воздухе. Напыляемые частицы ускоряются и нагреваются газовым потоком в протяженном разгонном канале горелочного устройства, являющемся составной частью газодинамического тракта. Специальное профилирование разгонного канала позволяет обеспечить необходимые энергетические характеристики частиц. В качестве топлива применяются горючие газы (метан, пропан, водород) или жидкое горючее (керосин, дизельное топливо). Максимальная температура в камере сгорания горелочного устройства составляет около 2200 К, максимальная скорость истечения газового потока — до 1800 м/с [9, 10]. Эта технология позволяет производить напыление практически любых металлических и полимерных материалов, допускающих нагрев до пластического состояния в воздушной среде, а также твердых сплавов на основе карбида вольфрама. Характерные значения скорости напыляемых частиц находятся в диапазоне 300–600 м/с в зависимости от их плотности и требуемого уровня нагрева. Достоинствами метода являются его экономичность, производительность и высокое качество получаемых покрытий. Наиболее высокое качество имеют нанесенные методом ВВТН покрытия из алюминия, цинка, меди, их сплавов и смесей. Технология высокоскоростного воздушно-топливного напыления оптимальна для нанесения антикоррозионных покрытий на крупногабаритные стальные изделия в полевых условиях [11].

Высокоскоростное кислородно-топливное напыление (ВКТН). В англоязычной литературе используется термин HVOF-spraying (аббревиатура от High Velocity Oxygen Fuel). Метод основан на разгоне и нагреве частиц напыляемого материала в высокотемпературном высокоскоростном потоке продуктов сгорания углеводородного топлива в кислороде. Ускорение и нагрев напыляемых частиц газовым потоком происходит либо в свободной струе, либо в разгонном канале горелочного устройства. Температура в камере сгорания достигает 3300 К, скорость истечения газового потока превышает 2300 м/с. При указанных условиях метод позволяет наносить покрытия из большинства существующих тугоплавких материалов, в том числе таких, как металлокерамика, оксидная и безоксидная керамика — а

также их сложных композиций. Характерные значения скорости напыляемых частиц находятся в диапазоне 400–900 м/с в зависимости от их плотности и требуемого уровня нагрева. Технология ВКТН наиболее подходит для создания функциональных (износостойких, теплозащитных, электроизоляционных и др.) покрытий на относительно дорогостоящих деталях машин [12].

Материалы и оборудование, применяемые для разработки ресурсосберегающих технологий высокоскоростного нанесения наноструктурированных покрытий. Установки для высокоскоростного газопламенного напыления — начиная от первых до самых современных — основаны на классической схеме жидкостного реактивного двигателя (ЖРД) со скоростью газового потока более 2000 м/с [8]. При этом плотность напыляемых покрытий достигает 99 %. В качестве наносимого материала используются порошки карбидов, металлокарбидов, сплавов на основе никеля (*Ni*), меди (*Cu*) и др. Высокая скорость напыляемых частиц обеспечивается достаточно большой скоростью продуктов сгорания за счет высокого давления в камере сгорания (до 1,0–1,5 МПа), а также введением в конструкцию сопла Лаваля.

При газопламенном проволочном напылении в покрытии содержится меньше оксидов, чем при порошковом напылении. Это важно для получения плотных коррозионностойких покрытий. Однако относительно малая скорость частиц не обеспечивает формирования плотных покрытий. Поверхность частиц успевает окислиться. Этим обусловлена особенность конструкции проволочного СГПН-распылителя — камера сгорания приближена к выходному отверстию сопла.

Увеличение скорости частиц при меньшей их температуре позволило снизить уровень окисленности частиц и повысить плотность порошкового покрытия. В порошковых распылителях СГПН первого и второго поколений использовалось цилиндрическое сопло.

В системах первого поколения давление в камере сгорания составляло 0,3–0,5 МПа. Скорость частиц — 450 м/с для порошка карбида вольфрама и твердых сплавов на его основе (WC-Co) грануляцией 10–45 мкм. Расход порошка — до 10 кг/ч. К таким системам относились Jet Cote, CDS, Top Gun 6, Diamond Jet и др.

В системах второго поколения давление в камере сгорания составляло 0,6–1,0 МПа. Скорость частиц — 600–650 м/с для порошка WC-Co грануляцией 10–45 мкм. Расход порошка — около 10 кг/ч.

В системах третьего поколения применяются расширяющиеся профильные сопла Лаваля, состоящие из пары усеченных конусов, сопряженных узкими концами. По мере движения газа по соплу его абсолютная температура и давление снижаются, а скорость возрастает. К таким системам относятся установки высокоскоростного напыления ТСЗП-HVOF-2001, GTV K2 и др. Расход порошка при этом составляет до 18 кг/ч.

Следует отметить, что в настоящее время вышеописанные процессы высокоскоростного напыления покрытий остаются малоизученными и находятся в стадии развития.

Ниже проведен сравнительный анализ особенностей современного оборудования в области сверхзвукового газопламенного напыления [6, 7]. Представленные данные необходимы при выработке направлений технического развития и для принятия решения об использовании на предприятии определенного вида оборудования.

В России используются зарубежные установки для высокоскоростного напыления Intelli-Jet (фирма «Шторм-ИТС») и DJ Hybrid (немецкое отделение фирмы Sulzer Metco) и многие другие. Современные установки Top Gun K, JP-5000, OSU Carbide Jet, DJ2600/2700, Intelli-Jet работают при давлении в камере сгорания 0,6–1,0 МПа [9], а увеличение скорости струи продуктов сгорания до сверхзвуковой происходит внутри горелки. Это обеспечивает повышение скорости частиц до 800 м/с. Кроме того, эффективность теплопередачи к частицам выше, чем у установок более ранних выпусков, что увеличивает производительность напыления при сравнимых расходах газов. Сравнение покрытий показывает, что по пористости, адгезии, микротвердости лучшие показатели у JP-5000, DJ 2600/2700, Intelli-Jet. Ниже приведен более подробный анализ современных установок и Top Gun — оборудования первого поколения.

Все эти комплексы стабильны в работе, оснащены компьютеризированными блоками управления и соответствуют требованиям электро- и пожарной безопасности. Они различаются видами применяемых газов и порошков, а также схемами их подачи.

В установках JP-5000 и Diamond Jet Hybrid (DJ2600/2700) в камеру сгорания подаются кислород и горючий газ. Комплексы отличаются конструктивным исполнением подачи порошка, схемой смешивания газов и видом горючего газа. Для JP-5000 — это керосин, для Diamond Jet Hybrid — пропан, пропилен, этилен (DJ2700) или водород (DJ2600). В этих системах предусмотрено водяное охлаждение, а в DJ-установках теплонагруженные узлы дополнительно охлаждаются воздухом. Интенсивная теплоотдача стенкам сопла и ствола при водяном охлаждении обусловливает высокие энергетические потери струи продуктов сгорания. Это вынуждает снижать производительность для поддержания определенного уровня качества.

Intelli-Jet отличается использованием воздуха в качестве как окислителя, так и охлаждающей среды. Горючие газы — пропан, пропилен. Для повышения эффективности камера сгорания оснащена каталитическим элементом, а распыляющая струя дополнительно подогревается в каскадном сопле.

Из табл. 1 видно, что наиболее технологична установка Intelli-Jet. Она не требует водяного охлаждения и использования кислорода в качестве окислителя [8].

Таблица 1

Расход материалов за 1 час работы

Материалы		Intelli-Jet	JP-5000	DJ2700	Top Gun
Кислород, м^3		–	60	18	21
Сжатый воздух, м^3		300	–	23	–
Топливо	Вид	Пропилен	Керосин	Пропилен	Пропилен
	Расход, кг	30	21	17	16
Азот, м^3		0,96	1,2	1,08	1,02
Вода на охлаждение, м^3		–	1	0,72	0,72

Согласно анализу данных производителей (табл. 2), Intelli-Jet обеспечивает наибольшие скорости частиц, а максимальные их температуры на 100 ^{o}C ниже точки плавления кобальта, составляющего матрицу сплава [7]. Эти отличия от других установок приводят к снижению окисления частиц и дают возможность повысить производительность напыления. Повышенные производительность и коэффициент использования порошка в Intelli-Jet обусловлены эффективностью многоступенчатой схемы горения смеси и особенностями ввода порошка в струю. Соотношение затрат на расходные материалы обусловливает для Intelli-Jet снижение в 1,6–2,5 раза относительной стоимости покрытий.

Таблица 2

Выходные параметры установок для сверхзвукового газопламенного напыления.
Распыляемый материал — WC-10Co-4Cr

Параметры	Intelli-Jet	JP-5000	DJ2700	Top Gun
Средняя скорость частиц, м/с	775	665	570	420
Максимальная температура частиц, К	1543	2078	2253	2573
Производительность напыления, кг/ч	26	12	9	2,1
Коэффициент использования распыляемого материала, %	68	40	64	60
Относительная стоимость напыления покрытия толщиной 0,5 мм, площадью 1 м^2 (включены затраты на запчасти, топливо, окислительный газ и порошок)	1	2,5	1,6	1,7

Анализ показал, что установки DJ Hybrid, GP-5000, Intelli-Jet позволяют наносить покрытия примерно одинакового уровня качества. По технологичности, производительности, относительным затратам на формирование покрытия наиболее предпочтительна установка Intelli-Jet.

Одной из наиболее эффективных универсальных российских установок высокоскоростного газопламенного напыления является ТСЗП-*HVOF*-К2. Данный комплекс оборудования предназначен для нанесения способом сверхзвукового газопламенного напыления износостойких, коррозионностойких, уплотнительных покрытий из карбидов вольфрама и хрома, металлов и сплавов, наноструктурированных материалов. Основные характеристики формируемых покрытий представлены в табл. 3.

Таблица 3

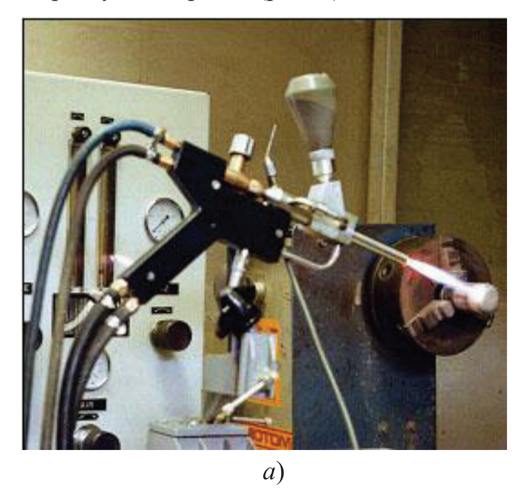
Основные характеристики покрытий, формируемых ТСЗП-HVOF-K2

Параметр	Значение
Твердость покрытия для Wc/Co (88/12) по методу Виккерса, HV	1100
Пористость покрытия для Wc/Co (88/12), %	< 1
Адгезия покрытия для Wc/Co (88/12), МПа	> 80

Скорость потока на выходе из сопла данной установки составляет 7–9 скоростей звука. Благодаря возможности получения малопористых покрытий с высокой адгезией, сверхзвуковая установка напыления широко использует-

ся для решения задач оптимизации производства, замены гальванического хромирования, никелирования, детонационного, вакуумного и ионно-плазменного напыления.

Комплекс портативного технологического оборудования СГН-1 (Россия) предназначен для сверхзвукового газопламенного напыления качественных покрытий с высокой адгезией, твердостью, плотностью, низкой пористостью, а также для сверхзвуковой резки (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Примеры использования установки СГН-1: при напылении (*а*); при резке (*б*)

Основные характеристики оборудования и формируемых покрытий представлены в табл. 4 [9].

Таблица 4

Основные характеристики покрытий, формируемых СГН-1

Параметр	Значение
Пористость покрытия, %	Не более 2
Адгезия покрытия, МПа	50–80 (до 100)
Толщина покрытия, мм	0,1–1,5 (до 5)

Для работы с данным оборудованием необходимо иметь лишь баллоны с горючим газом и кислородом, а также водопровод (либо емкость с водой объемом 500 л и насос). По эксплуатационным затратам, сложности, требуемой квалификации обслуживающего персонала СГН-1 соответствует серийно выпускаемым дозвуковым горелкам для газопламенного напыления, однако позволяет повысить качество покрытий в 2–5 раз. По эффективности данное оборудование эквивалентно современному плазменному технологическому комплексу (при снижении стоимости покрытия в 1,5–2 раза) [13].

Комплекс СГН-1 является переносным, в отличие от западных аналогов: Jet Kote II (Deloro Stellite GmbH), Diamond Jet (Sulzer Metco), Top Gun (GTV), JP-5000 (Praxair). Другие особенности СГН-1:

— может эксплуатироваться в любых условиях, в том числе полевых;

— примерно в 20 раз дешевле аналогов;

— имеет расширенные функциональные возможности (кроме напыления может резать высоколегированную сталь, чугун, цветные металлы).

Результаты исследований и их анализ. Применение высокоскоростных методов (в отличие от дозвуковых) позволяет получить покрытие с гораздо более высокими эксплуатационными характеристиками. Кроме того, такие покрытия могут наноситься на изделия сложной формы, изготовленные практически из любых металлов и сплавов. Технологическая схема нанесения покрытий высокоскоростным газотермическим напылением представлена на рис. 2.

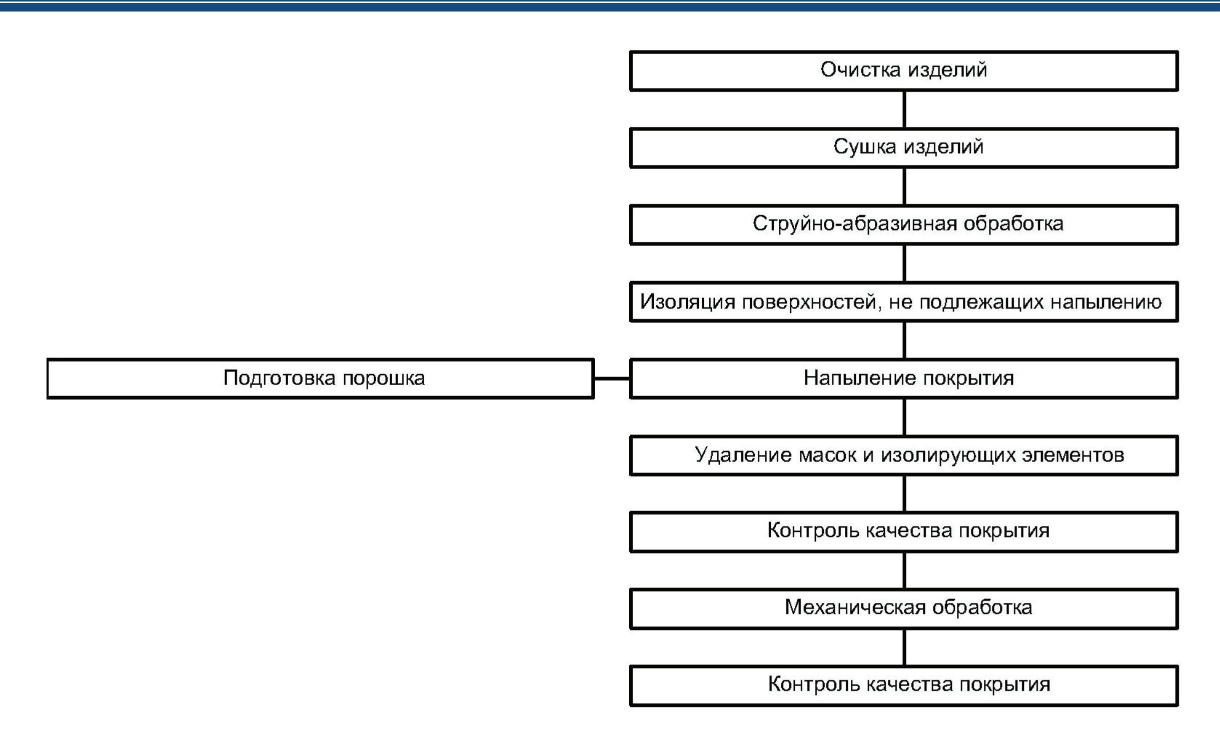


Рис. 2. Технологическая схема нанесения покрытий высокоскоростным газотермическим напылением

Широкий набор материалов, высокая производительность и характеристики покрытий, полученных высокоскоростным газопламенным напылением, позволяют эффективно использовать данный метод для нанесения антикоррозионных и износостойких покрытий в различных сферах. Такие покрытия успешно заменяют электролитический хром, устойчивы к высокотемпературной коррозии в агрессивных средах, могут использоваться в ремонтном производстве, авиации и энергетике для паровых и газовых турбин, эффективно работают в условиях интенсивного абразивного изнашивания (рис. 3).



Рис. 3. Восстановление изношенных поверхностей: детали КПП (*а*); плунжеры насоса (*б*); коленчатые валы (*в*)

В рамках практического использования высокоскоростных газотермических методов напыления весьма интересен опыт японской фирмы Mishima Cosan, которая использует сверхзвуковое газопламенное напыление для нанесения покрытий на стенки кристаллизаторов установок непрерывной разливки стали. Данная технология позволяет получать плотные покрытия стабильного качества, которые могут заменить гальванические покрытия на основе никеля.

Некоторые характеристики покрытий Ni-Cr, полученных сверхзвуковым напылением, и гальванических покрытий *Ni*, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Сравнение некоторых характеристик покрытий

Покрытие	Твердость, HV	Теплопроводность, ккал / м·ч·град*	Линейное расширение $\times 10^6$, 1/ град
Ni-Cr, полученное сверхзвуковым напылением	600	10	13
Ni, полученное гальваническим способом	200	72	14
*Теплопроводность — ккал на метр-час-градус. В материале одна калория теплоты в час передается на расстояние один метр вследствие разницы температур в один градус.			

При повышенных температурах твердость *Ni-Cr* газотермического покрытия также значительно выше, чем у *Ni* гальванопокрытия (рис. 4).

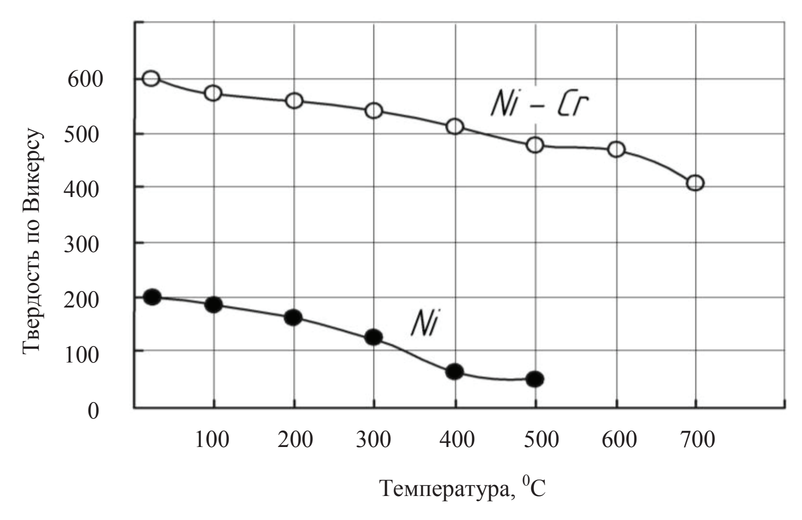


Рис. 4. Твердость Ni-Cr газотермического покрытия (HVOF) и Ni гальванопокрытия при повышенных температурах

Сравнение покрытий, полученных *HVOF*, и гальванических покрытий по износу и коэффициенту трения при повышенных температурах показывает аналогичные зависимости (рис. 5).

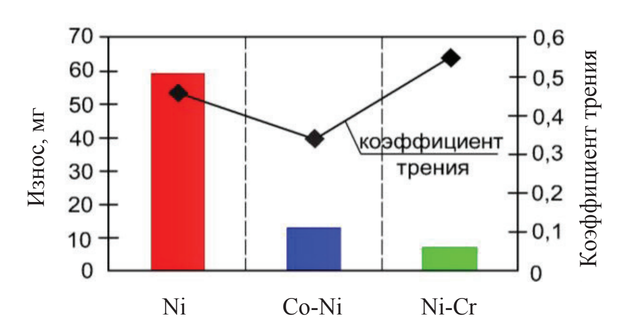


Рис. 5. Сравнение износа и коэффициента трения Ni-Cr газотермического покрытия, Co-Ni и Ni гальванопокрытий при высокотемпературных испытаниях

Из приведенных данных видно, что износостойкость покрытий, полученных сверхзвуковым газопламенным напылением, значительно выше износостойкости гальванических покрытий.

Выводы

1. В настоящее время сверхзвуковые способы напыления все активнее применяются при восстановлении и упрочнении изношенных деталей, для увеличения износостойкости, защиты изделий от коррозии, повышения тепло- и электропроводности. Вместе с тем многие факторы формирования наноструктурированных покрытий еще недостаточно изучены.

2. Дальнейшее развитие высокоскоростных способов напыления представляется весьма перспективным. В первую очередь это связано с возможностью получения покрытий с физико-механическими и эксплуатационными свойствами, которые невозможно обеспечить гальваническими и традиционными газотермическими методами напыления. Кроме того, существует постоянная необходимость повышения надежности, простоты и производительности применяемого оборудования.

Библиографический список

1. Голубев, И. Г. Опыт восстановления деталей для сельскохозяйственной техники / И. Г. Голубев, П. А. Табаков // Техника и оборудование для села. — 2013. — № 3. — С. 39–40.
2. Инженерные методы обеспечения долговечности и надежности машин и технологического оборудования в промышленности / И. Н. Кравченко [и др.]. — Москва : Эко-Пресс, 2011. — 424 с.
3. Технологии нанесения защитных и износостойких покрытий повышенной прочности / А. Ф. Пузряков [и др.]. — Москва ; Ставрополь : Эко-Пресс ; АГРУС, 2013. — 300 с.
4. Алхимов, А. П. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / А. П. Алхимов, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев ; под ред. В. М. Фомина. — Москва : Физматлит, 2010. — 536 с.
5. Кузнецов, Ю. А. Исследование характеристик покрытий, полученных холодным газодинамическим напылением / Ю. А. Кузнецов, В. В. Гончаренко // Техника и оборудование для села. — 2013. — № 12. — С. 39–42.
6. Эффективные технологические методы нанесения покрытий газопламенным напылением / И. Н. Кравченко [и др.] // Вестник Мос. гос. агроинж. ун-та им. В. П. Горячкина. — 2015. — № 1. — С. 36–41.
7. Кузнецов, Ю. А. Краткий обзор оборудования для сверхзвукового газопламенного напыления / Ю. А. Кузнецов // Наукові нотатки. — Вып. 33. — Луцьк : ЛНТУ, 2011. — С. 110–114.
8. Балдаев, Л. Х. Газотермическое напыление : учебное пособие для вузов / Л. Х. Балдаев, В. Н. Борисов, В. А. Вахалин. — Москва : Маркет ДС, 2007. — 344 с.
9. Кузнецов, Ю. А. Инновационные способы газотермического напыления покрытий / Ю. А. Кузнецов, В. В. Гончаренко, К. В. Кулаков. — Орел : ОрелГАУ, 2011. — 124 с.
10. Термодинамическое упрочнение сварных и наплавленных изделий сельскохозяйственного машиностроения / Е. М. Зубрилина [и др.]. — Ставрополь : АГРУС, 2012. — 392 с.
11. Кравченко, И. Н. Технологии высокоскоростного нанесения наноструктурированных покрытий / И. Н. Кравченко, Ю. А. Кузнецов, А. В. Гуревский, А. А. Коломейченко, А. С. Алмосов // Строительные и дорожные машины. — 2015. — № 2. —С. 10–15.
12. Черноиванов, В. И. Восстановление деталей машин (состояние и перспективы) / В. И. Черноиванов, И. Г. Голубев. — Москва : Росинформагротех, 2010. — 371 с.
13. Пузряков, А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления : учебное пособие / А. Ф. Пузряков. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 360 с.

References

1. Golubev, I.G., Tabakov, P.A. Opyt vosstanovleniya detaley dlya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki. [The experience in agricultural machinery parts reconditioning.] Machinery and Equipment for Rural Area, 2013, no. 2, pp. 39–40 (in Russian).
2. Kravchenko, I.N., et al. Inzhenernye metody obespecheniya dolgovechnosti i nadezhnosti mashin i tekhnologicheskogo oborudovaniya v promyshlennosti. [Engineering methods to ensure durability and reliability of machines and manufacturing equipment in industry.] Moscow: Eko-Press, 2011, 424 p. (in Russian).
3. Puzryakov, A.F., et al. Tekhnologii naneseniya zashchitnykh i iznosostoykikh pokrytiy povyshennoy prochnosti. [Technology of application of protective and wear resistant ruggedized coatings.] Moscow; Stavropol: Eko-Press; AGRUS, 2013, 300 p. (in Russian).
4. Alkhimov, A.P., Klinkov, S.V., Kosarev, V.F.; Fomin, V.M., ed. Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie. Teoriya i praktika. [Cold gas spraying. Theory and practice.] Moscow: Fizmatlit, 2010, 536 p. (in Russian).
5. Kuznetsov, Yu. A., Goncharenko, V.V. Issledovanie kharakteristik pokrytiy, poluchennykh kholodnym gazodinamicheskim napyleniem. [Study of characteristics of coatings obtained by cold gas-dynamic sputtering.] Machinery and Equipment for Rural Area, 2013, no. 12, pp. 39–42 (in Russian).

6. Kravchenko, I.N., et al. Effektivnye tekhnologicheskie metody naneseniya pokrytiy gazoplamennym napyleniem. [Effective processing coating flame-spraying methods.] Vestnik of MSAU, 2015, no. 1, pp. 36–41 (in Russian).

7. Kuznetsov, Yu. A. Kratkiy obzor oborudovaniya dlya sverkhzvukovogo gazoplamennogo napyleniya. [Quick overview of equipment for supersonic flame spraying.] Luts'k: LNTU, 2011, Наукові нотатки, iss. 33, pp. 110–114 (in Russian).

8. Baldayev, L.Kh., Borisov, V.N., Vakhalin, V.A. Gazotermicheskoe napylenie: uchebnoe posobie dlya vuzov. [Gas-thermal spraying: Study guide for higher schools.] Moscow: Market DS, 2007, 344 p. (in Russian).

9. Kuznetsov, Yu.A., Goncharenko, V.V., Kulakov, K.V. Innovatsionnye sposoby gazotermicheskogo napyleniya pokrytiy. [Innovative methods of coating thermal spraying.] Orel: OrelGAU, 2011, 124 p. (in Russian).

10. Zubrilina, E.M., et al. Termodinamicheskoe uprochnenie svarnykh i naplavlennykh izdeliy sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya. [Thermodynamic hardening of welded and built-up products of Agricultural Engineering.] Stavropol': AGRUS, 2012, 392 p. (in Russian).

11. Kravchenko, I.N., Kuznetsov, Yu.A., Gurevskiy, A.V., Kolomeychenko, A.A., Almosov, A.S. Tekhnologii vysokoskorostnogo naneseniya nanostrukturirovannykh pokrytiy. [Technologies of high-speed application of nanostructured coatings.] Construction and Road Building Machinery, 2015, no. 2, pp. 10–15 (in Russian).

12. Chernoivanov, V.I., Golubev, I.G. Vosstanovlenie detaley mashin (sostoyanie i perspektivy). [Restoration of machine parts (state and prospects).] Moscow: Rosinformagrotekh, 2010, 371 p. (in Russian).

13. Puzryakov, A.F. Teoreticheskie osnovy tekhnologii plazmennogo napyleniya : uchebnoe posobie. [Theoretical foundations of plasma spray technology: Study guide.] 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2008, 360 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 05.02.2015
Сдана в редакцию 06.02.2015
Запланирована в номер 30.06.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791.052:620.178.4 DOI 10.12737/12605

Влияние надреза на склонность сварных соединений к межзеренному разрушению*

Ю. В. Полетаев[1], В. Ю. Полетаев[2], Д. В. Рогозин[3]**
[1, 2, 3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Notch effect on the liability of welded joints to intergranular fracture***

Yu. V. Poletaev[1], V. Yu. Poletaev[2], D. V. Rogozin[3]**
[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы является исследование воздействия поверхностного надреза на склонность зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений жаропрочных высоколегированных сталей к хрупкому межзеренному разрушению. Представлено теоретическое обоснование и описаны эксперименты, демонстрирующие механизм указанного воздействия. Исследовано влияние остроты надрезов типа Шарпи и Менаже на долговечность сварных соединений стали 12Х18Н12Т, 07Х18Н9 и 03Х16Н9М2 при высокотемпературном (Т = 823 К) низкочастотном малоцикловом нагружении, имитирующем условия нестационарного режима эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок с реакторами на быстрых нейтронах. Установлено, что сварные соединения исследованных сталей проявляют различную чувствительность к надрезу, зависящую от пластических свойств и склонности к дисперсионному твердению металла ЗТВ. В результате проведенной работы экспериментально доказана значимость высокой пластичности зерен аустенита, свободных от выделений вторичных дисперсных фаз, упрочняющих матрицу. Именно этим фактором обусловлена высокая стойкость металла зоны термического влияния низкоуглеродистой стали 03Х16Н9М2 против межзеренного разрушения. Результаты исследования позволяют сделать следующий вывод: при работе со сварными соединениями жаропрочных сталей, эксплуатирующихся в условиях высокотемпературного низкочастотного малоциклового нагружения, недопустимы «мелкие» поверхностные надрезы — технологические дефекты типа подрез, несплавление, надрыв.

The work objective is to study the surface notch impact on the liability of the heat affected zone (HAZ) of welded joints of the heat-resistant high-alloy steels to brittle intergranular fracture. The theoretical justification is presented, and experiments that demonstrate the mechanism of this effect are described. The impact of the notch acuity of Charpy- and Mesnager-type on the welds life of 12H18N12T, 07H18N9 03H16N9M2 steel at high-temperature (T = 823K) low-frequency low-cycle loading simulating the conditions of a non-stationary operation mode of the equipment and pipelines of the nuclear power plants with fast-neutron reactors is investigated. It is found that the welds of the steels under study exhibit different notch sensitivity depending on the plastic properties and liability to the HAZ metal dispersion hardening. As a result of the work, the significance of the high ductility of the austenite grains free from the second-phase dispersed precipitates reinforcing matrix is shown by experiments. The high resistance of the metal of the HAZ of 03H16N9M2 low-carbon steel from the intergranular fracture is due to this factor. The findings lead to the following conclusion: “minor” surface notches – technological defects such as notch groove, lack of fusion, tear – are unacceptable when operating with welded joints of heat-resistant steels under the high-temperature low-frequency low-cycle loading.

Ключевые слова: сварные соединения; зона термического влияния; надрез; механизм межзеренного разрушения, факторы разрушения.

Keywords: welded joints, heat affected zone, notch, mechanism of intergranular fracture, factors of destruction.

Введение. В реальных условиях эксплуатации даже пластичные конструкционные материалы разрушаются хрупко. Это происходит, в первую очередь, из-за наличия различных концентраторов напряжений — механических надрезов,

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: anclav51@mail.ru, afshor@mail.ru, dmrogozin@ya.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

http://vestnik.donstu.ru

поверхностных и внутренних технологических дефектов, резких переходов от толстого к более тонкому сечению и др. [1, 2]. Поэтому в описываемом случае конструкционная прочность может оказаться ниже, чем определенная методом обычных испытаний «гладких» образцов. Более того, влияние надреза на поведение материала неоднозначно. Так, квазистатическая и статическая прочность при наличии надреза в общем случае возрастает, а длительная статическая прочность и усталостная прочность (предел выносливости) надрезанных образцов в той или иной степени понижаются [3]. В этой связи необходимо проведение экспериментального исследования для оценки чувствительности сварных соединений к надрезу в условиях сложного низкочастотного малоциклового нагружения (НМН).

Цель работы: получить новые экспериментальные данные по влиянию остроты поверхностных надрезов на склонность к межзеренному локальному разрушению (ЛР) металла зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений в условиях НМН, имитирующих нестационарный режим работы энергетического оборудования и трубопроводов при температуре выше 773 К.

Методика исследования. В работе использовали отрезки паропроводных труб из стали 12Х18Н12Т и промышленные плавки аустенитных сталей 07Х18Н9, 03Х16Н9М2. Химический состав и механические свойства указанных аустенитных сталей соответствовали требованиям нормативных документов. Сварные соединения стали 12Х18Н12Т выполнили по монтажной технологии ручной дуговой сваркой (РДС) электродами марки ЦТ-26 на проволоке СВ-08Х16Н9М2. Часть сварных соединений после сварки подвергли аустенитизации при Т = 1373 К с выдержкой 1 час и охлаждением на воздухе. Сварные соединения стали 07Х18Н9 и 03Х16Н9М2 изготовили в условиях ОАО «ЭМК-Атоммаш» по штатной технологии производства сварных узлов реакторной установки БН-800. РДС пластин толщиной 60 мм из стали 03Х16Н9М2 произвели электродами марки ЦТ-46 на проволоке СВ-03Х16Н9М2-ВИ. Сварные соединения испытывали в исходном после сварки состоянии. Пластины толщиной 40 мм из стали 07Х18Н9 сварены электродами марки 48-А-2Т. Сварные соединения испытывали в состоянии после аустенитизации при Т = 1323 К с длительностью выдержки 1 час.

Оценку влияния остроты надреза на склонность к ЛР металла ЗТВ сварных соединений выполнили в условиях НМН в соответствии с методикой работы [4]. Испытывали призматические образцы:

— с поперечным сварным швом без надреза («гладкие»);

— по линии сплавления механическим способом наносили один краевой надрез различной остроты глубиной 1,0 мм (рис. 1).

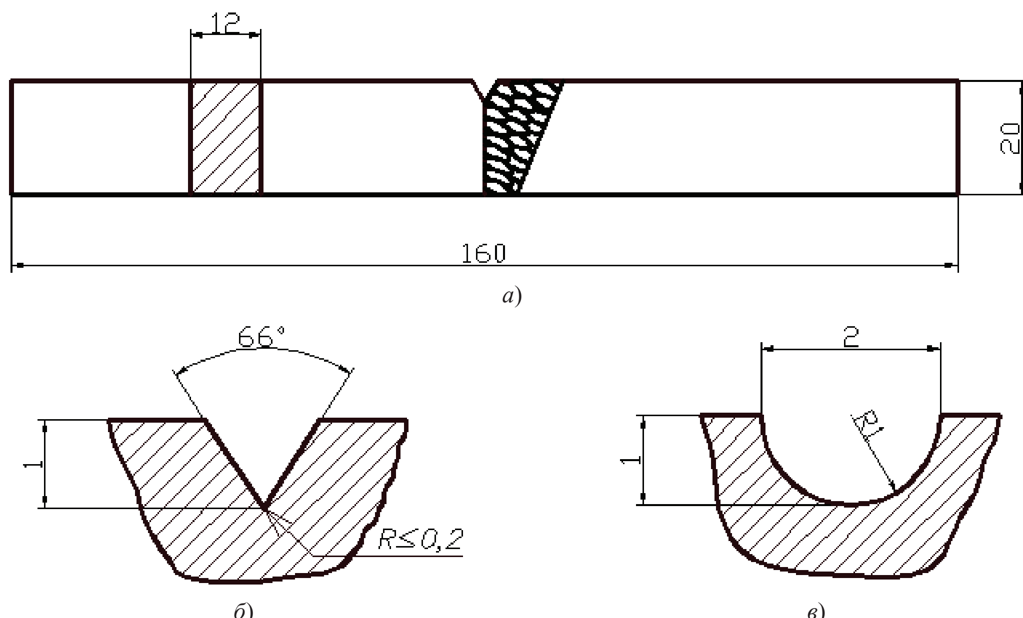


Рис. 1. Плоский сварной образец (*а*) с краевым надрезом типа Шарпи (*б*) или Менаже (*в*)

Подобные «мелкие» надрезы имитируют различные поверхностные технологические дефекты сварных соединений — подрезы, несплавления, надрывы и т. п. Для полукруглого надреза Менаже и треугольного Шарпи величина теоретического коэффициента концентрации напряжений (α_σ) составляет соответственно 3,0 и 5,3 [5]. Плоскость надреза располагали перпендикулярно действию главного напряжения. Осуществляли знакопеременный циклический изгиб образца до заданной величины амплитуды *Ea* с длительностью выдержки τ = 24 ч в полуцикле растяжения при Т = 823 К. В полуцикле сжатия выдержка составляла 10 минут. В соответствии с рекомендациями работы [6] выбрана частота цикла нагружения $\gamma = 1/\tau + t$ = 0,042 цикл/час.

Анализ экспериментальных данных. Полученные результаты работы свидетельствуют, что металл ЗТВ сварных соединений исследованных сталей проявляет различную чувствительность к надрезу в условиях высокотемпературного НМН.

Как и следовало ожидать, наименьшая долговечность Np характерна для металла ЗТВ образцов из дисперсионно твердеющей стали 12Х18Н12Т в исходном после сварки состоянии (рис. 2).

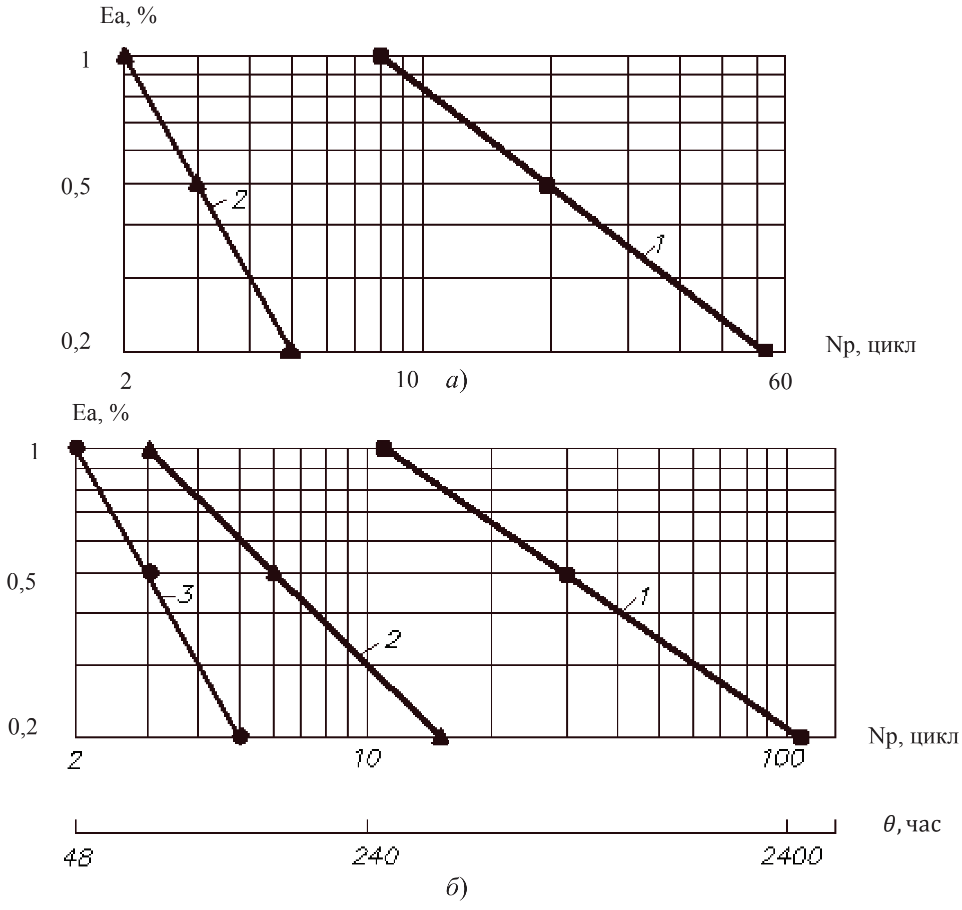
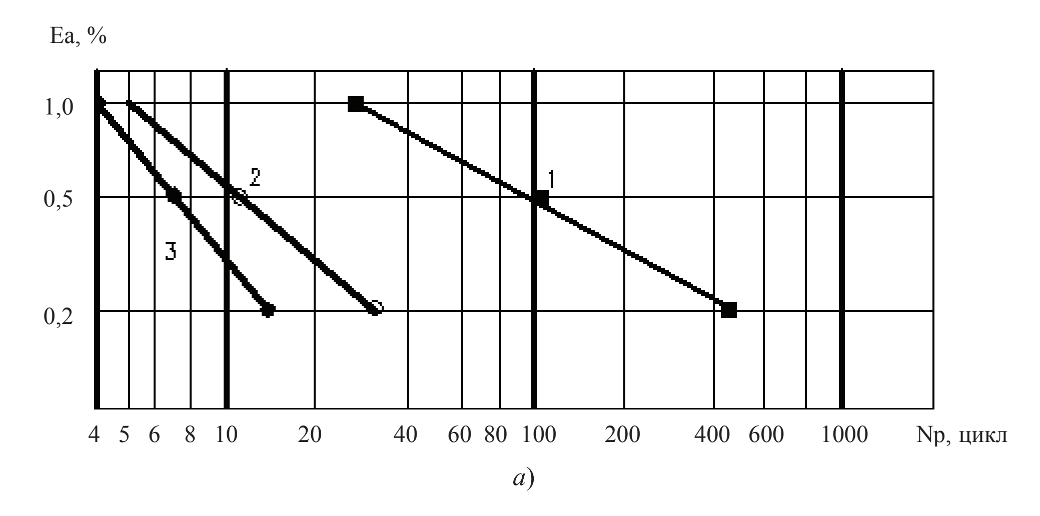


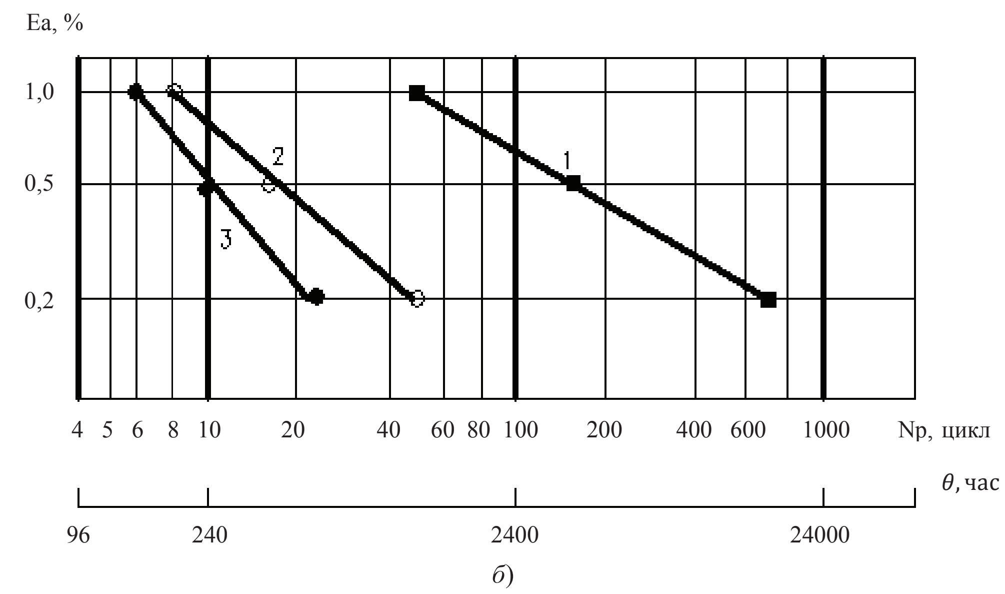
Рис. 2. Влияние остроты надреза (α_σ) на низкочастотную малоцикловую прочность сварных соединений стали 12Х18Н12Т в исходном после сварки состоянии (*а*) и после аустенитизации (*б*) при Т = 823 К и ν = 4,2 · 10^{-2} цикл/час: 1 — без надреза; 2 — надрез типа Менаже (α_σ = 3,0); 3 — надрез типа Шарпи (α_σ = 5,3)

Это связано с высокой чувствительностью стали к термодеформационному циклу сварки, что не позволяет сформировать требуемую структурную и химическую однородность металла ЗТВ даже при выполнении сварных соединений методом РДС с обоснованной расчетом погонной энергией до 0,4 МДж/м [7]. Аустенитизация способствовала заметному повышению долговечности, что связано с восстановлением свойств границ зерен металла ЗТВ, ослабленных в результате проскальзывания и сегрегаций на них примесей, а также снижением структурной и химической неоднородности. Однако даже после аустенитизации наличие надреза приводит к заметному понижению долговечности *Np* сварных соединений стали 12Х18Н12Т. Экспериментально подтверждено, что чувствительность металла ЗТВ к надрезу зависит от пластических свойств аустенитных сталей. Наиболее высокими пластическими свойствами и долговечностью при рабочих температурах обладают сварные соединения стали 03Х16Н9М2 (рис. 3).

Установлено, что увеличение амплитуды деформации *Еа* и наличие поверхностного надреза стимулируют склонность к ЛР металла ЗТВ. Так, нанесение надреза типа Шарпи снизило долговечность сварных соединений примерно на порядок. Эти результаты свидетельствуют, что поверхностные трещиноподобные дефекты (надрезы) являются недопустимыми, так как способствуют образованию ЛР металла ЗТВ сварных соединений при НМН.



а)



б)

Рис. 3. Влияние концентрации напряжений (α_σ) на долговечность сварных соединений стали 07Х18Н9 (*а*) и 03Х16Н9М2 (*б*) при T = 823 K и V = 4,2 · 10^{-2} цикл/час: 1 — без надреза; 2 — надрез типа Менаже (α_σ = 3,0); 3 — надрез типа Шарпи (α_σ = 5,3)

Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден механизм влияния надреза на хрупкое разрушение металла ЗТВ. Рассмотрим случай чистого изгиба образца прямоугольного сечения, ослабленного односторонним краевым надрезом (рис. 1). В его нижней части (в ΔABC) реализуется равномерно распределенное поле напряжений сжатия τ = 2 · $\tau_т$ ($\tau_т$ — предел текучести материала при сдвиге), параллельное основанию, а в верхней части вблизи дуги A′B′ — осесимметричное поле скольжения — пластическая зона (рис. 4).

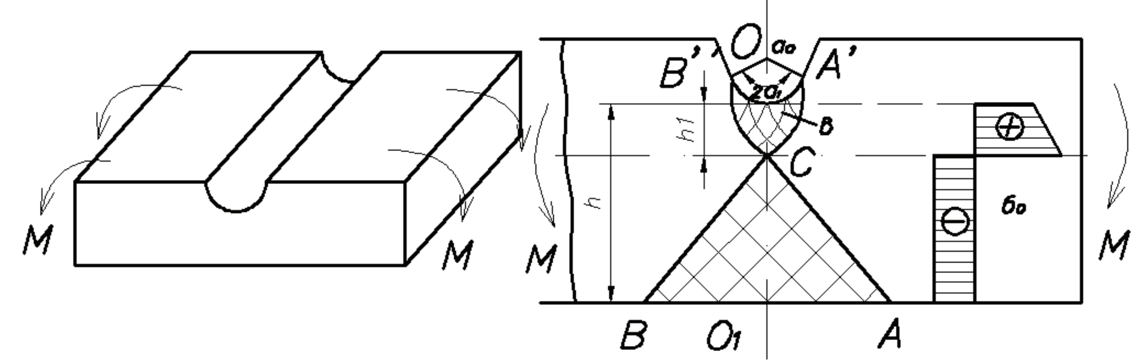


Рис. 4. Пластическая зона у дна надреза

При этом компоненты тензора напряжений в цилиндрической системе координат [8]:

$$\sigma_r = 2 \times \tau_T \times Ln\frac{r}{2a_1};\ \sigma_\theta = 2 \times \tau_T \times Ln\frac{r}{2a_1},$$

где *r* — радиус-вектор, исходящий из центра О.

При переходе образца в предельное состояние области ABC и AB′C соединяются в точке C, положение которой определяется из условия:

$$\int_a^{a+h} \sigma_Q \times dr = 0.$$

Надрез — это не только концентратор напряжений, но и место локализации деформации. С энергетической точки зрения пластическая зона — это объем, который путем пластической деформации перерабатывает релаксирующую упругую энергию около надреза (трещины) в запасенную энергию и тепло, рассеивающееся в объеме тела. Эти процессы создают эффективную поверхностную энергию дефекта $\gamma_{эфф} >> \gamma$ и снижают энергетическую выгодность роста трещины. Однако часть энергии пластической деформации запасается в виде энергии дислокаций и их ансамблей. Тем самым в пластической зоне создаются предпосылки к релаксационным процессам. Одним из таких процессов может быть разрушение.

Чувствительность металла к надрезу в значительной мере зависит от факторов, которые либо способствуют, либо тормозят развитие конкурирующих кинетических процессов — пластической деформации и разрушения. Если скорость процесса пластической деформации выше, чем у процесса разрушения, то микропластическая деформация успевает пройти около концентраторов напряжений раньше, чем там начнется разрушение. В результате величина напряжений уменьшится до уровня ниже предельного значения. Именно поэтому при уменьшении релаксационной способности материала наблюдается переход от вязкого к более хрупкому разрушению.

У трещины в плоскости (предельно острого концентратора напряжений) ее касательные напряжения меньше $\tau_т$, поэтому пластической деформации там нет. Для эллиптических надрезов характерны большие касательные напряжения, способствующие развитию процесса пластической деформации. Иными словами, вблизи неострого надреза тензор напряжений в исходном состоянии сильно отклоняется от шарового. Но уже после сравнительно небольшой деформации En >> 10 % он снова становится шаровым (за счет напряжения от дислокационных зарядов), и пластическая деформация прекращается.

Процессы зависят от величины деформации в зоне и характеризуются большими локальными напряжениями $\sigma_л \geq 0,1\, x\, \sigma_{теор}$, инициирующими разрушение. Процессы релаксации $\sigma_л$ за счет протекания пластической деформации тормозятся при наличии в структуре высоких потенциальных барьеров, например мелкодисперсных карбидных частиц. Именно по этой причине пластичность материала заметно снижается при наличии большого числа мелких и хрупких включений. Уменьшение пластичности снижает $\gamma_{эфф}$ трещины и, следовательно, ее критические размеры, начиная с которых рост трещины становится энергетически выгодным.

Увеличение концентрации частиц второй фазы повышает высоту и число потенциальных барьеров на пути скольжения дислокаций. При этом пластичность уменьшается, сокращается размер пластической зоны и величина деформации в ней, а следовательно, увеличивается $\sigma_л$ у вершины надреза (трещины) и ускоряется процесс разрушения.

С этим связана наиболее низкая долговечность и высокая чувствительность к надрезу сварных соединений стали 12Х18Н12Т. Наиболее высокие пластические свойства при рабочих температурах имеет низкоуглеродистая сталь 03Х16Н9М2 (таблица 1). Чем выше пластичность, тем больше работа пластической деформации (даже при наличии концентратора напряжений), меньше скорость образования и развития трещины и больше долговечность.

Таблица 1

Механические свойства сталей*

Марка стали	Температура испытания, К	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	Ψ, %
07Х18Н9	293	563	280	61,0	69,5
	823	365	140	38,1	66,9
03Х16Н9М2	293	527	223	72,0	79,1
	823	354	132	41,6	70,0
12Х18Н12Т	293	603	295	58,1	65,4
	873	365	152	20,2	58,0
*Средние данные по результатам испытаний трех образцов.					

Большую склонность к хрупкому разрушению при НМН сварных соединений стали 07Х18Н9 по сравнению со сталью 03Х16Н9М2 также можно объяснить, сопоставив стандартные механические свойства исследуемых сталей. Известно, что с повышением прочностных свойств повышается чувствительность стали к концентрации напряжений, что сказывается на долговечности надрезанных образцов. С другой стороны, если в данных условиях испытаний у сталей интервалы между $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_в$ не равны, то одинаковая степень перегрузки по отношению к $\sigma_{0,2}$ оказывается раз-

личным приближением к пределу прочности. Поэтому при прочих равных условиях разрушение быстрее наступит у стали с рабочим напряжением, более близким к $\sigma_в$.

Расчеты показывают следующее. Если сварное соединение работает при *Ea* = 0,5 % и 823 К, то даже при наличии надрезов с α_σ = 3,0…5,3 замена конструкционного материала (сталь 12Х18Н12Т и 07Х18Н9 на сталь 03Х16Н9М2) приведет к повышению долговечности (соответственно в 3–5 и 1,4–1,5 раза).

Заключение.

1. Установлен механизм влияния надреза на склонность к локальному разрушению металла ЗТВ сварных соединений аустенитных сталей 12Х18Н12Т, 07Х18Н9 и 03Х16Н9М2 в условиях низкочастотного малоциклового нагружения. Показано, что поверхностный дефект (надрез) следует рассматривать в связи с образованием локальной области упругопластических перегрузок и возникновением в результате циклического нагружения трещины, являющейся еще более острым концентратором.

2. Теоретически обоснованно и экспериментально подтверждено, что надрез стимулирует склонность металла ЗТВ к ЛР — тем большую, чем острее надрез и выше статическая прочность конструкционного материала. С ростом пластических свойств при умеренной прочности аустенитной стали чувствительность металла ЗТВ к надрезу снижается.

3. Более высокая пластичность стали 03Х16Н9М2 обеспечила ее меньшую повреждаемость в зоне надреза и большую долговечность сварных соединений по сравнению со сталями 12Х18Н12Т и 07Х18Н9.

Библиографический список

1. Игнатов, В. А. Оценка влияния технологических дефектов на прочность элементов сварных конструкций при малоцикловом нагружении / В. А. Игнатов, Г. П. Карзов // Сварочное производство. — 1974. — № 10. — С. 20–23.

2. Лукьянов, В. Ф. Анализ причин разрушения металлических конструкций опорного узла стрелового крана / В. Ф. Лукьянов, С. С. Ассауленко // Вестник Дон. гос техн. ун-та. — 2014. — Т. 14. — № 4 (79). — С. 186–193.

3. Поведение стали при циклических нагрузках / под ред. В. Даля ; пер. с нем. под общ. ред. В. Н. Геминова. — Москва : Металлургия, 1982. — 568 с.

4. Полетаев, Ю. В. Влияние химической микронеоднородности на склонность к локальному разрушению металла ЗТВ сварных соединений / Ю. В. Полетаев //Сварочное производство. — 2012. — № 3. — С. 10–13.

5. Петерсон, Р. Коэффициенты концентрации напряжений / Р. Петерсон. —Москва : Мир, 1977. — 302 с.

6. Елизаров, Д. П. Паропроводы тепловых электростанций (переходные режимы и некоторые вопросы эксплуатации) / Д. П. Елизаров. — Москва : Энергия, 1980. — 264 с.

7. Полетаев, Ю. В. Длительная малоцикловая прочность сварных соединений и выбор аустенитно-стабильных сталей / Ю. В. Полетаев. — Новочеркасск : ЛИК, 2010. — 281 с.

8. Писаренко, Г. С., Можаровский, Н. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести / Г. С. Писаренко, Н. С. Можаровский. — Киев : Наукова думка, 1981. — 496 с.

9. Poletaev, Yu. V. Evolution of welded joint crack resistance in the conditions of low-cyclic / Yu. V. Poletaev // Welding International. — 1987. — № 3. — P. 211–213.

10. Nissley, N.-E. Development of the strain-to-fracture test for evaluating ductility-dip cracking in austenitic alloys / N.-E. Nissley, J.-C. Lippold // Welding Journal. — 2003. — № 82 (12). — P. 355–364.

11. Brooks, J.-A. Weld solidification and cracking behavior of free-machining stainless steel / J.-A. Brooks, C.-V. Robino, T.-J. Headley, J.R. Michael // Welding Journal. — 2003. — № 2 (3). — P. 51–64.

References

1. Ignatov, V.A., Karzov, G.P. Otsenka vliyaniya tekhnologicheskikh defektov na prochnost' elementov svarnykh konstruktsiy pri malotsiklovom nagruzhenii. [Assessment of the impact of technological defects on the strength of the elements of welded structures under low-cycle loading.] Svarochnoe Proizvodstvo, 1974, no. 10, pp. 20–23 (in Russian).

2. Lukyanov, V.F., Assaulenko, S.S. Analiz prichin razrusheniya metallicheskikh konstruktsiy opornogo uzla strelovogo krana.[Failure analysis of boom seat metal structures.] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 4 (79), pp. 186–193 (in Russian).

3. Dal, V., ed. Povedenie stali pri tsiklicheskikh nagruzkakh. [The behavior of steel under cyclic loading.] Moscow: Metallurgiya, 1982, 568 p. (in Russian).

4. Poletaev, Yu.V. Vliyanie khimicheskoy mikroneodnorodnosti na sklonnost' k lokal'nomu razrusheniyu metalla *ZTV* svarnykh soedineniy. [Influence of chemical microheterogeneity on tendency to the local destruction of metal in the heat affected zone (HAZ) of welded joints.] Svarochnoe Proizvodstvo, 2012, no. 3, pp. 10–13 (in Russian).

5. Peterson, R. Koeffitsienty kontsentratsii napryazheniy. [Stress concentration factors.] Moscow: Mir, 1977, 302 p. (in Russian).

6. Yelizarov, D.P. Paroprovody teplovykh elektrostantsiy (perekhodnye rezhimy i nekotorye voprosy ekspluatatsii). [Steam pipelines of thermal power stations (transient modes and some operational issues).] Moscow: Energiya, 1980, 264 p. (in Russian).

7. Poletaev, Yu. V. Dlitel'naya malotsiklovaya prochnost' svarnykh soedineniy i vybor austenitno-stabil'nykh staley. [Long-term low-cycle strength of welded joints and selection of stable austenitic steels.] Novocherkassk: LIK, 2010, 281 p. (in Russian).

8. Pisarenko, G.S., Mozharovskiy, N.S. Uravneniya i kraevye zadachi teorii plastichnosti i polzuchesti. [Equations and boundary value problems of the theory of plasticity and creep.] Kiev: Naukova dumka, 1981, 496 p. (in Russian).

9. Poletaev, Yu. V. Evolution of welded joint crack resistance in the conditions of low-cyclic. Welding International, 1987, no. 3, pp. 211–213.

10. Nissley, N.-E., Lippold, J.-C. Development of the strain-to-fracture test for evaluating ductility-dip cracking in austenitic alloys. Welding Journal, 2003, vol. 82, no. 12, pp. 355–364.

11. Brooks, J.-A., Robino, C.-V., Headley, T.-J., Michael, J.R. Weld solidification and cracking behavior of free-machining stainless steel. Welding Journal, 2003, no. 2 (3), pp. 51–64.

Поступила в редакцию 22.04.2015
Сдана в редакцию 23.04.2015
Запланирована в номер 30.06.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 669.187.66.00 DOI 10.12737/12594

Металлизованные железорудные окатыши и повышение эффективности их применения при электроплавке стали в дуговой печи*

Л. Н. Крахт[1], Э. Э. Меркер[2], А. Ю. Кем[3], В. А. Степанов[4]**
[1, 2, 4] Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова, филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Старый Оскол, Российская Федерация
[3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Impact of using metallized iron ore pellets to increase the efficiency of electric arc furnace***

L.N. Krakht[1], E.E. Merker[2], A.Y. Kem[3], V.A. Stepanov[4]**
[1, 2, 4] Stary Oskol Technological Institute after A.A.Ugarov (NITU "MISiS" branch), Stary Oskol, Russian Federation
[3] Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель работы — установить влияние металлургических свойств металлизованных окатышей и способа их подачи в ванну дуговой печи на интенсификацию нагрева и плавления железорудных металлизованных окатышей (ЖМО) в шлакометаллическом расплаве агрегата. Предложен способ подачи окатышей через осевые каналы электродов, позволяющий одновременно с окатышами подавать в зону плавления ЖМО через отверстия в электродах сыпучие добавочные материалы (известь, коксик, окалину и др.). Таким образом обеспечиваются условия полного погружения дуг в образующийся вспененный шлак. Исследовано влияние оксидов железа различного фазового и химического составов на пластические свойства окатышей. Установлено, что инвариантность микроструктуры офлюсованных окатышей, в том числе фазового состава связки, определяется уровнем офлюсования и различием валентных состояний железа. Повышение эффективности плавления ЖМО достигается путем подачи в шлакометаллическую ванну окатышей с улучшенными физико-химическими и технологическими свойствами, а также добавочных материалов через осевые каналы электродов.

The work objective is to determine the effect of the metallurgical properties of iron-rich pellets and of the method of their submission to the arc furnace bath on the intensification of the heating and melting of the iron metallized pellets (IMP) in the slag-metal melt unit. A method of supplying pellets through the electrode axial passages that allows, simultaneously with the pellets, feeding supplementary bulk materials (lime, coke fines, scale, etc.) to the IMP melting zone through the holes in the electrodes is offered. Thus, the conditions of the full immersion of the arcs into the formed foaming slag are provided. The effect of iron oxides of various phase and chemical compositions on the plastic properties of pellets is investigated. It is found that the microstructure invariance of fluxed pellets including the bonded phase composition is determined by the level of fluxing and the difference of the iron valent states. Improvement in the efficiency of IMP melting is achieved by feeding pellets with improved physicochemical and technological properties, as well as supplementary materials, into the slag-metal bath through the axial passages of the electrodes.

Ключевые слова: металлизованные окатыши, свойства, вспененный шлак, эффективность, электроплавка, электрод, дуговая печь.

Keywords: metallized pellets, properties, foamed slag, efficiency, electric smelting, electrode, arc furnace.

Введение. На современном этапе развития электросталеплавильного производства активно применяются технологии электроплавки железорудных металлизованных окатышей (ЖМО) в дуговых печах. При этом серьезное внимание уделяется вопросам достижения высоких технико-экономических показателей, повышения качества металлопродукции и снижения энергоемкости производства [1, 2]. В работах [3, 4] приведены данные по результатам исследований пластических свойств ЖМО при восстановлении, представлены особенности микроструктуры обожженных и метал-

*Работа выполнена в рамках гос. задания №11.63.2014/ИК.
**E-mail: lkrakht@mail.ru, merker@inbox.ru, akem@donstu.ru, Viktor1990_31@mail.ru
*** The research is done within the frame of the government task no. 11.63.2014/IK.

лизованных окатышей. Установлено, что проявляющиеся при восстановлении пластические свойства окатышей определяются в первую очередь их микроструктурой, включающей поровое пространство, и фазовым составом связок.

В этой связи **цель настоящей работы** — установить, каким образом металлургические свойства металлизованных окатышей и способ их подачи в ванну дуговой печи влияют на интенсификацию нагрева и плавления ЖМО в шлакометаллическом расплаве агрегата.

Экспериментальная часть. Исследования проводили на экспериментальной установке [3], позволяющей оценить влияние различных добавок фазообразующих оксидов на пластические свойства ЖМО. В качестве восстановительного газа использовали реформированный газ, содержащий 73,5 % H_2; 16,4 % CO; 6,7 % CO_2; 2,6 % CH_4.

Пластические свойства определяли по величине усадки слоя окатышей в процессе восстановления. Для испытаний отбирали пробу массой 1200 г из окатышей определенного состава (размером 12,5–16; 11,2–12,5 и 8–11,2 мм в количестве 30, 25 и 45 %), размещали ее в реакционной камере и определяли высоту слоя окатышей до восстановления. После чего камеру с окатышами помещали внутрь печи и проводили восстановление при 850 $^{\circ}C$ в течение 3 часов. Затем с помощью пресс-цилиндра к испытуемой пробе прикладывалась постоянная давящая нагрузка в течение 5 минут. После охлаждения пробы в азоте замеряли высоту слоя восстановленных окатышей.

Усадку слоя определяли измерением в конце испытаний высоты слоя пробы, %:

$$YS = (H_M - H_M^в) \cdot 100 / H_M , \quad (1)$$

где, H_M $H_M^в$ — высота слоя материала до и после восстановления, мм; YS — усадка слоя при восстановлении, %.

Результаты и их обсуждение. Анализ полученных результатов показал, что уменьшение содержания как основных, так и кислотных оксидов приводит к увеличению усадки слоя окатышей в процессе их восстановления, что согласуется с данными [3].

Исследования [4–6] доказывают, что, рассматривая влияние различных факторов на качество окатышей, необходимо принимать во внимание воздействие всех компонентов химического состава с учетом их взаимосвязей. Инвариантность микроструктуры офлюсованных окатышей (в том числе фазового состава связки) определяется уровнем офлюсования и различием валентных состояний железа (Fe^{3+} или Fe^{2+}) [3]. Один из комплексных показателей, отражающих потребительские свойства офлюсованных окатышей, — модуль микроструктуры Шкодина:

$$M_M = Fe_0 \cdot CaO / (Fe^{2+} \cdot SiO_2), \quad (2)$$

где Fe_0 — доля общего содержания железа в пробе.

Анализ влияния данного модуля на усадку слоя окатышей в восстановительной атмосфере показал следующее. Повышение доли общего железа, сопровождающееся уменьшением содержания оксидов кремния, способствует улучшению пластических свойств окатышей. Однако увеличение степени офлюсования позволяет их снизить. Таким образом, чем меньше содержание SiO_2, тем больше должна быть основность окатышей. Это объясняется тем, что в процессе окислительного обжига формирование связки протекает преимущественно в системе Fe_2O_3 — CaO — SiO_2 и для упрочнения ферритной связки требуется повышенная основность при низком содержании SiO_2. Но связка из ферритов кальция не гарантирует горячей прочности окатышей, поскольку при восстановлении гематит, находящийся в связке, также восстанавливается, что приводит к разрушению окатышей [3, 6].

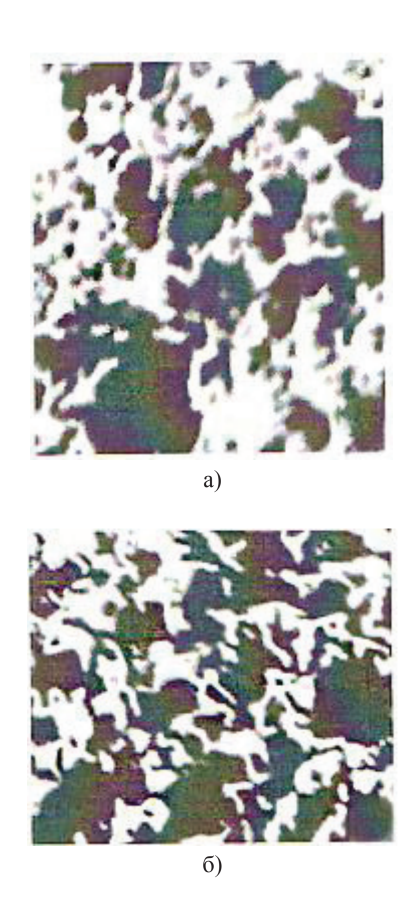
Установлено [4], что структура и фазовый состав обожженных окатышей в значительной степени определяют такие их металлургические свойства, как прочность, набухание, усадка слоя, спекаемость в процессе восстановления.

Прочность железорудного сырья обусловлена, в свою очередь, механическими свойствами связок, образующихся при обжиге. Их фазовый состав и морфология зависят от химического состава используемого в процессе обжига железорудного концентрата, а также вводимых в шихту добавок, газовой фазы. В значительной степени это относится к флюсующим добавкам. Проведены исследования роли состава шихты в формировании структуры и фазового состава обожженных окатышей [4].

Стремление к повышению «горячей» прочности и восстановимости окатышей при одновременном уменьшении их пластических свойств привело к необходимости производства офлюсованных окатышей при переходах $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$ и $Fe_3O_4 \rightarrow FeO$. Однако дальнейшее восстановление $FeO \rightarrow Fe_{мет}$ сопровождается повышением пластических свойств металлизованного продукта.

Микроструктурный анализ показал, что окатыши из шихты разных составов имеют незначительные отличия. Поверхность их неровная, трещин нет ни на поверхности, ни внутри окатышей (рис. 1). Окисление полное до гематита. Поры в окатышах в основном мелкие, округлой формы, распределены по сечению окатыша равномерно. Однако

образуются и крупные поры (в небольшом количестве в местах крупных включений известняка), распределение их случайное. Наблюдается образование гематитовой связки спекания и силикатной связки — стекла. Окатыши имеют зернистую микроструктуру, однородную по всему сечению. Добавки бентонита и известняка формируют силикатную связку.



а)

б)

Рис. 1. Микроструктура краевой (а) и центральной (б) зон окатыша при 250-кратном увеличении: области белого цвета — гематит, зеленый — силикатная связка (стекло). На части (а) видны остаточные включения бентонита в виде округлых образований с мелкозернистыми выделениями вторичных оксидов, на части (б) — крупные зерна кварца (фиолетовый) и поры (синий)

При определении фазового состава металлизованных окатышей установлено, что среднее содержание металлического железа в них колебалось в пределах 70–77%. Отмечено также присутствие незначительного количества оксидов железа, силикатной связки.

Металлическое железо представлено в виде сплошной сетки по всему сечению окатышей. Детальное изучение микроструктуры показало, что распределение фазовых составляющих по сечению окатышей далеко не равномерное, просматривается тенденция к увеличению количества связки в наружных, периферийных слоях окатыша. Пористость окатыша увеличивается к центру.

Проведенные микроструктурные исследования позволили выявить общие закономерности механизма формирования структуры связки рудной части окатыша. Отмечено, что во всех пробах обожженных окатышей увеличение их общей пористости происходит при добавлении известняка (вследствие его диссоциации).

Таким образом, анализируя связь микроструктуры с характеристиками поведения окатышей в процессе восстановления, необходимо отметить следующее. Оксид алюминия переходит в фазы связки (ферритную и силикатную), тем самым повышая уровень прочности окатышей, снижая их склонность к спеканию, уменьшая усадку и увеличивая восстановимость. Поэтому для получения прочных окатышей, имеющих большую восстановимость, необходимо иметь соотношение оксидов кальция и алюминия в пределах 2–2,5 [3, 4].

Металлографические исследования [5, 7] показали, что после подачи окатышей в ванну дуговой печи на их поверхности образуется гарнисажная корочка (рис. 2). Она может быть как шлаковой, так и шлакометаллической.

Другие зоны в структуре окатыша формируются температурой и длительностью нахождения образца в железоуглеродистом расплаве ванны дуговой печи.

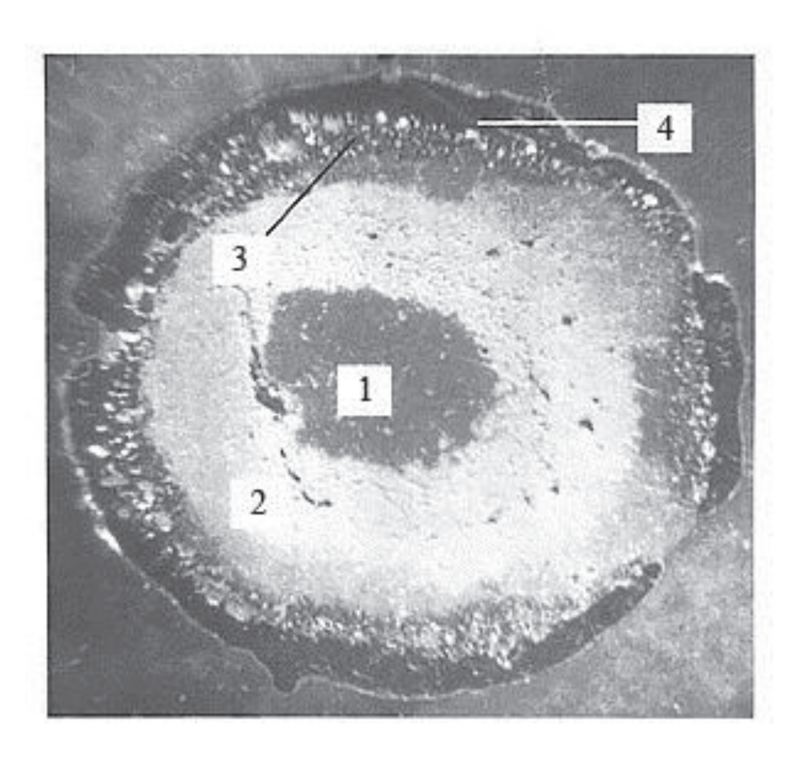


Рис. 2. Особенности (в разрезе) структуры ЖМО при кратковременном погружении его в железоуглеродистый расплав: 1 - центр окатыша; 2 - зона с упрочненной структурой; 3 - промежуточная зона; 4 - гарнисажная корочка на поверхности окатыша

Установлено, что при непрерывной подаче ЖМО в ванну дуговой печи через полые электроды время плавления потока ЖМО в шлако-металлическом расплаве дуговой печи снижается более чем в 1,5 раза [1, 2, 7].

По ходу движения окатышей через осевые каналы электродов в объёме электрической дуги они нагреваются за счёт излучения и тепловой поток, воздействующий на поток окатышей, рассчитывается [1, 5] с использованием обобщённой системы выражений:

$$q_{изл} = \begin{cases} \varepsilon_{np} \cdot C_0 \cdot [T_\partial / 100]^4 - [T_{ok} / 100]^4 \cdot F_0, \\ где_F_0 = 3 \cdot V_{ok} \cdot \tau_{nad} / (p_{ok} \cdot r_{ok})_при \\ \tau_{nad} = (\sqrt{V_x^2 + 2h \cdot a_2} - V_x) / a_2 \end{cases} \quad (3)$$

где ε_{np} – приведённая степень черноты, равная для поверхности окатыша 0,9; C_0 – излучательная способность абсолютно чёрного тела, равная 5,67 Вт/м²*К⁴; T_∂ - температура дуги, принятая при расчётах 5000 К; $F_0 = F_{ok} \cdot n_{ok}$ - тепловая мощность, принимающая поверхностью порции окатышей в объёме дуги, где F_{ok} и n_{ok} - поверхность окатыша и их количество в дуге; V_{ok} - расход окатышей, кг/с; τ_{nad} – время падения окатыша, с; ρ_{ok} и r_{ok} - плотность (кг/м³) и радиус окатыша, м; V_x - скорость падения окатыша на выходе из отверстия электрода, м/с; h – высота падения окатыша, м; a_2 – ускорение движения окатыша по длине отверстия в электроде, м/с².

http://vestnik.donstu.ru

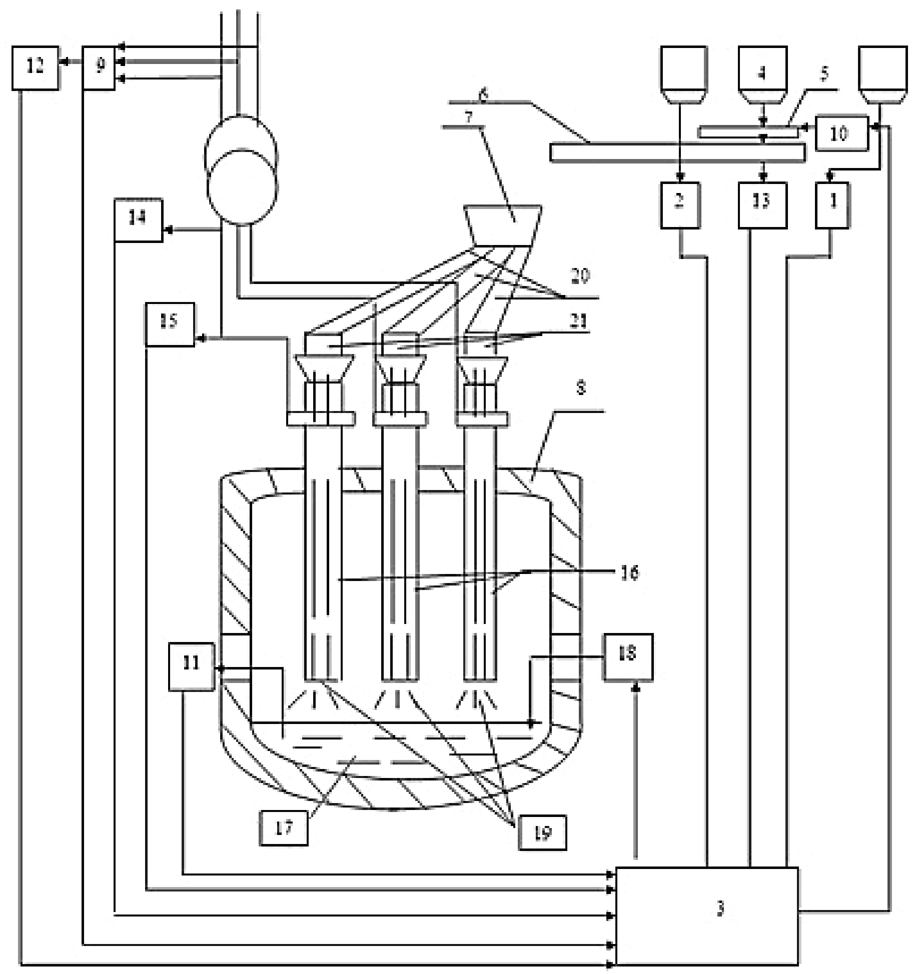


Рис. 3. Схема дуговой печи с системой подачи ЖМО через осевые каналы в электродах и управление ходом электроплавки ЖМО в агрегате:
1 — расход металлошихты на плавку; 2 — датчик расхода сыпучих (известь и др.); 3 — управление ЭВМ; 4 — бункер расхода окатышей в электроды; 5 и 6 — конвейеры для загрузки окатышей и сыпучих материалов; 7 — приемная воронка; 8 — дуговая печь; 9 — датчик потребляемой активной мощности; 10 — исполнительный механизм; 11 — система контроля температуры металла в печи; 12 — датчик потребляемой мощности печи; 13 — сигналы с датчиков расхода окатышей; 14 — датчики тока; 15 — датчики напряжения; 16 — трубчатые (полые) электроды; 17 — металл и шлак в ванне печи; 18 — расчет теплоусвоения ванны ($\Delta q_в$, кВт); 19 — электрические дуги; 20 — гибкие шланги; 21 — воронки-изоляторы на электродах

Повышение эффективности тепловой работы ДСП-150 наблюдается при использовании топливно-кислородных горелок (ТКГ). Результаты обработки опытных данных (более 30 паспортов плавок) свидетельствуют об ускорении процессов плавления ЖМО [3, 7] и улучшении технико-экономических показателей электроплавки стали. Соответствующие данные отражены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты обработки опытных данных работы ДСП-150 с непрерывной загрузкой ЖМО и применения ТКГ для интенсификации процесса

№ п/п	Показатели	Марки стали	
		ШХ15	Углеродистая сталь
1	Время плавки под током, мин	100/85*	95/87
2	Удельный расход кислорода на тонну годного металла, м³/т	14,5/30,2	12,1/30,73
3	Удельный расход углерода на тонну годного металла, кг/т	18/13	7/10,5
4	Удельный расход окатышей на тонну годного металла, кг/т	650/720	640/700
5	Коэффициент использования металлизованного сырья $G_{ок}/G_{лом}$	2,1/2,1	1,3/1,95
6	Удельный расход извести на шлакообразование, кг/т	55/68	51/82,6
7	Энергозатраты на процесс плавки, МДж/т	2482/2111	2152/2000
8	Производительность дуговой печи, т/ч	60,96/75,61	83,5/88,5
*Числитель — работа ДСП без применения ТКГ, знаменатель — с ТКГ			

Из приведенных в таблице данных следует, что использование ТКГ для интенсификации шлакообразования и вспенивания шлака приводит к повышению производительности ДСП. Например, при расходе энергии двух горелок 50–70 кВт · ч/т стали достигается сокращение удельного расхода электроэнергии на 35–50 кВт · ч/т жидкой стали.

При использовании системы подачи ЖМО через трубчатые (полые) электроды ДСП представляется возможным одновременно с окатышами подавать в зону плавления ЖМО сыпучие материалы (известь, коксик, окалину, известняк и др.). Тем самым обеспечивается полное погружение дуг в образующийся вспененный шлак. В этом случае практически вся лучистая энергия от дуг идет на нагрев и плавление окатышей на поверхности металла и шлака в кипящей ванне.

Выводы. Результаты исследования металлографичеческих и физико-химических свойств металлизованных окатышей, а также способ их подачи в ванну дуговой печи позволяют наметить пути интенсификации нагрева и плавления ЖМО в шлакометаллическом расплаве агрегата. При загрузке ЖМО через полые электроды в ванну дуговой печи скорости нагрева и плавления окатышей возрастают в 1,5–2 раза. При этом снижается удельный расход электроэнергии на процесс плавки стали.

Библиографический список

1. Меркер, Э. Э. Электроплавка металлизованных окатышей в дуговой печи / Э. Э. Меркер, Е. А. Черменев. — Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2015. — 320 с.

2. Меркер, Э. Э. Энергосберегающие условия плавления металлизованных окатышей в ванне дуговой печи / Э. Э. Меркер // Черная металлургия. — 2008. — № 1. — С. 35–39.

3. Результаты исследований пластических свойств окатышей при восстановлении / А. С. Тимофеева [и др.] // Сталь. — 2008. — № 2. — С. 2–3.

4. Микроструктура обожженных и металлизованных окатышей / Л. Н. Крахт // Известия вузов. Черная металлургия. — 2007. — № 10. — С. 7–8.

5. Меркер, Э. Э. Повышение эффективности электроплавки стали путем подачи металлизованного сырья в зону высоких температур через каналы в электродах дуговой печи / Э. Э. Меркер, В. А. Степанов // Черная металлургия. — 2014. — № 1. — С. 41–49.

6. Пузанов, В. П. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз / В. П. Пузанов, В. А. Кобелев. — Екатеринбург : Уральский институт металлов, 2001. — 634 с.

7. Меркер, Э. Э. Особенности технологии электроплавки окатышей в дуговой печи / Э. Э. Меркер, А. В. Сазонов, А. А. Гришин // Известия вузов. Черная металлургия. — 2008. — № 2. — С. 21–23.

References

1. Merker, E.E., Chermenev, E.A. Elektroplavka metallizovannykh okatyshey v dugovoy pechi. [Electrosmelting of metallized pellets in arc furnace.] Staryy Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii, 2015, 320 p. (in Russian).

2. Merker, E.E. Energosberegayushchie usloviya plavleniya metallizovannykh okatyshey v vanne dugovoy pechi. [Energy-saving conditions for melting metallized pellets in the arc furnace bath.] Chernaya metallurgiya, 2008, no. 1, pp. 35–39 (in Russian).

3. Timofeyeva, A.S., et al. Rezul'taty issledovaniy plasticheskikh svoystv okatyshey pri vosstanovlenii. [Results of the research of pellet plastic properties under reduction.] Stal', 2008, no. 2, pp. 2–3 (in Russian).

4. Krakht, L.N., et al. Mikrostruktura obozhzhennykh i metallizovannykh okatyshey. [Microstructure of the fired and metallized pellets.] Izvestia. Ferrous Metallurgy, 2007, no. 10, pp. 7–8 (in Russian).

5. Merker, E.E., Stepanov, V.A. Povyshenie effektivnosti elektroplavki stali putem podachi metallizovannogo syr'ya v zonu vysokikh temperatur cherez kanaly v elektrodakh dugovoy pechi. [Improving the efficiency of steel electric smelting by supplying metallized raw material in the high temperature zone through channels in the arc furnace electrodes.] Chernaya metallurgiya, 2014, no. 1, pp. 41–49 (in Russian).

6. Puzanov, V.P., Kobelev, V.A. Strukturoobrazovanie iz melkikh materialov s uchastiem zhidkikh faz. [Structurization of fine materials with liquid phases.] Ekaterinburg: Ural Institute of Metals, 2001, 634 p. (in Russian).

7. Merker, E.E., Sazonov, A.V., Grishin, A.A. Osobennosti tekhnologii elektroplavki okatyshey v dugovoy pechi. [Technology features of electric smelting of pellets in arc furnace.] Izvestia. Ferrous Metallurgy, 2008, no. 2, pp. 21–23 (in Russian).

Поступила в редакцию 23.04.2015
Сдана в редакцию 23.04.2015
Запланирована в номер 30.06.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК541.135'669.21 DOI 10.12737/12597

Закономерности получения электролитических порошков меди на виброкатоде и исследование их свойств*

М. В. Корчагина[1], А. А. Науменко[2], В. М. Липкин [3]**
[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2,3] Южно-Российский государственный технический университет, г. Новочеркасск, Российская Федерация

Impact of the vibrocathode on the patterns and properties of electrolytic copper powders***

M.V.Korchagina[1], A. A.Naumenko[2], V. M. Lipkin[3]**
[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2,3] South-Russian State Technical University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

Описываются методы получения ультрадисперсных порошков меди из отходов травления печатных плат. Приводятся режимы получения медного порошка в анодно-синтезируемом хлоридно-аммониевом электролите с применением виброкатода, позволяющие интенсифицировать процесс по сравнению с аналогичным на стационарном катоде за счет уменьшения диффузионного слоя. Производительность получения медного порошка в предлагаемых условиях составляет 0,25 г/(см^2·ч), средний размер частиц 3-4 мкм. Отмечается высокая производительность процесса по сравнению с применением сульфатных электролитов, положительное влияние формы и размеров получаемого порошка меди на процессы легирования материалов на основе железа. Рассматриваются свойства антифрикционных материалов, легированных полученным катодным порошком меди в сравнении с материалами легированными порошком меди ПМС-1. Наблюдается эффект улучшения эксплуатационных свойств образцов, легированных порошком меди, полученным из медно-аммиачного раствора.

Ключевые слова: ультрадисперсные порошки, наноразмерные порошки, электролиз, виброкатод, утилизация металлосодержащих отходов.

Methods for obtaining ultrafine copper powders from the etching waste of the printed circuit boards are described. Modes of obtaining copper powder in the anode-synthesized chloride-ammonium electrolyte using vibrocathode that allows intensifying the process as compared to the similar one at the stationary cathode by reducing diffusion layer are described. The productivity of copper powder obtaining in the offered terms is 0.25 g/(cm^2·h), mean particle size is 3-4 microns. High efficiency of the process compared with the use of sulphate electrolytes, and a positive effect of the shape and size of the obtained copper powder on the processes of alloying Fe-based materials are reported. Properties of the antifriction materials doped with the obtained cathode copper powder in comparison with the materials alloyed with the PMS-1copper powder are considered. The effect of the working properties improvement of the samples doped with copper powder obtained from a copper-ammonium solution is observed.

Keywords: ultrafine powders, nanosized powders, electrolysis, vibrocathode, metallic waste reclamation.

Введение. В настоящее время разработан большой арсенал методов получения ультрадисперсных и наноразмерных порошков, обладающих заданными физико-химическими свойствами [1–5]. Особую актуальность приобретает поиск высокопроизводительных, простых, доступных, экологически безопасных способов. Одним из возможных подходов к решению данной проблемы может служить использование методов электрохимического синтеза порошков из медно-аммиачных растворов травления печатных плат и анодно-синтезируемых хлоридно-аммониевых электролитов с применением виброэлектрода [6]. Существенным достоинством этих методов является высокая производительность. Виброэлектрод представляет собой «Ш-образный» сердечник с электрическими обмотками, к которому присоединен

* Работа выполнена по заданию Минобрнауки РФ №2945 (5.14) «Материалы для альтернативных энергетических и технологических комплексов: синтез, свойства, применение».
** E-mail: ms.korchaginamv@mail.ru, Sashajalempi@gmail.com, syan199165@gmail.com
*** The research is done by order of the RF Ministry of Education and Science no. 2945 (5.14) "Materials for alternative energy and technological complexes: synthesis, properties, and applications".

рифленый катод [7]. Частота колебаний постоянна и равна 100 Гц, а амплитуда ~2 мм. Существенным достоинством этих методов является высокая производительность, которая способствует возможности утилизации большого класса металлсодержащих отходов.

Экспериментальная часть. Рассматриваются процессы получения медных порошков на стационарном и виброкатоде из медно-аммиачного раствора соли, содержащей 40 % $[Cu(NH_3)_4]Cl_2$ и 60 % $[Cu(NH_3)_2]Cl_2$, полученного из отходов утилизации печатных плат.

При проведении экспериментов использован комплекс электрохимических методов исследования: циклическая вольтамперометрия, потенциостатический, гальваностатический, температурно-кинетический методы. Электрохимические измерения проводились на потенциостате PC-Pro MF. Измерения проводились в медно-аммиачном растворе указанных солей с массовой концентрацией 25 г/л, скорость развертки потенциала 4 мВ/с. Потенциалы приводятся в шкале нормального водородного электрода. По результатам поляризационных измерений была произведена идентификация катодных процессов путем сравнения участков, обозначенных на рисунке цифрами со стандартными электродными потенциалами (рис. 1).

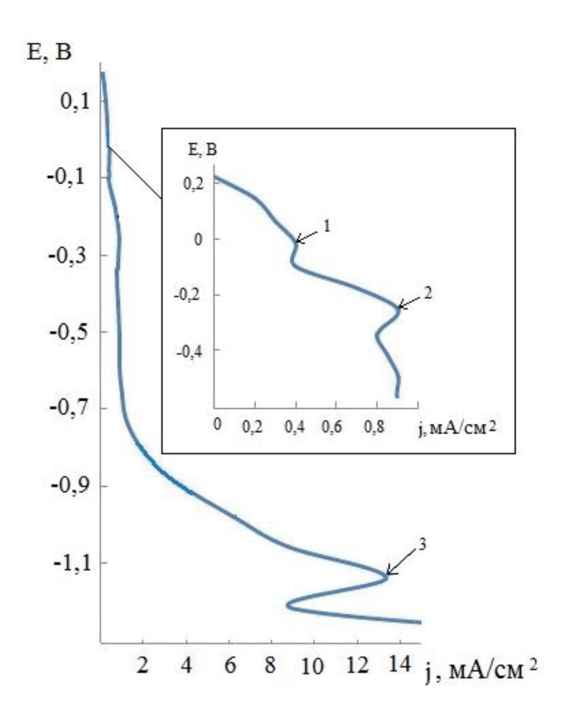


Рис. 1. Катодные поляризационные кривые в медно-аммиачном растворе

В рассматриваемом растворе предположительно идентифицированы следующие процессы: катодное восстановление комплексных ионов меди и выделение водорода из ионов аммония (таблица 1).

Таблица 1

Катодные процессы в медно-аммиачном растворе

Номер процесса	Потенциал предельного тока, В	Процесс	Стандартный электродный потенциал, В
1	от 0 до -0,05	$[Cu(NH_3)_4]^{2+} + 2e = Cu + 4NH_3$	-0,05
2	от -0,2 до 0,25	$[Cu(NH_3)_2]^{+} + e = Cu + 2NH_3$	-0,12
3	от -0,9 до -1	$2NH_4^{+} + 2e + 2H_2O = H_2 + 2(NH_3 \cdot H_2O)$	-0,547

Обсуждение и результаты. Применение виброкатода позволяет увеличить предельный ток в 3,6–3,8 раза по сравнению со стационарными условиями получения порошка за счет уменьшения толщины диффузионного слоя, связанного с циркуляционным перемешиванием электролита (рис. 2).

Производительность процесса получения порошка в анодно-синтезируемом хлоридно-аммониевом электролите с использованием виброкатода составляет 0,25 г/(см^2·ч), что значительно выше, чем для сульфатного электролита [8].

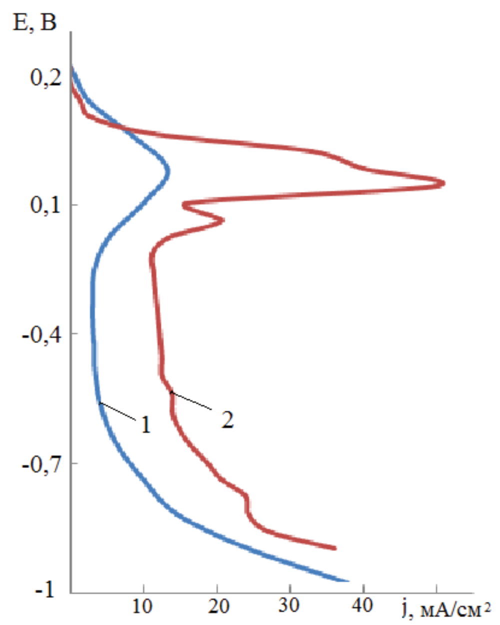


Рис. 2. Катодные кривые в растворе 25г/л соли на титановом катоде в стационарных (кривая 1) и виброусловиях (кривая 2), ν=4мВ/с

Средний размер частиц, порошка меди, полученного из анодно-синтезируемого электролита, составляет 9–11 мкм в безмембранном и 3–4 мкм в мембранном варианте электролизера (рис. 3).

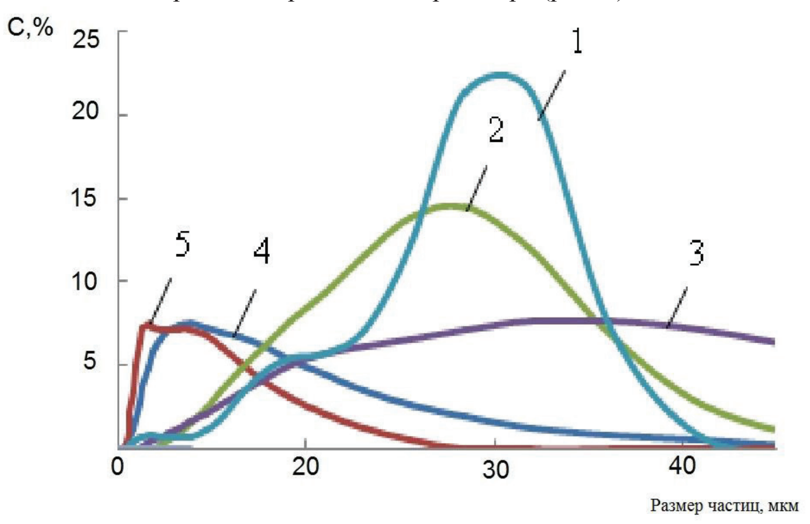
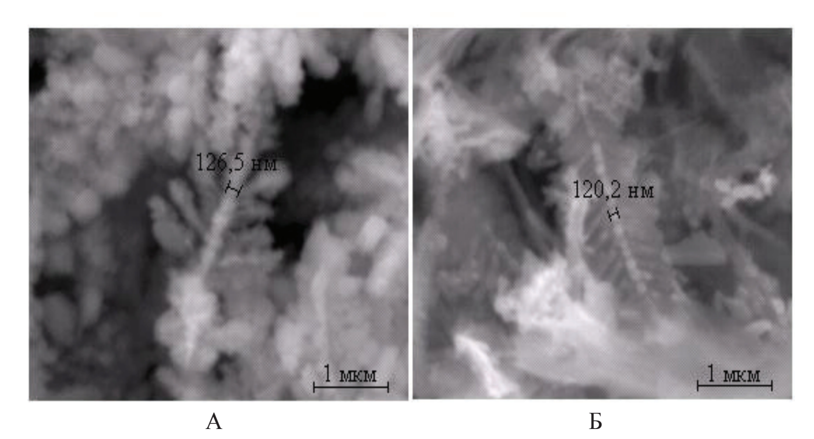


Рис.3. Кривые распределения содержания частиц порошков (С, %) , полученных из анодно-синтезируемых электролитов, по размерам:
1—порошок марки ПМС-1;
2—из сернокислого электролита после 6 ч электролиза;
3—из сернокислого после 10 ч электролиза;
4—из хлоридно-аммониевого без мембраны;
5—из хлоридно-аммониевого с мембраной

Частицы медного порошка, образующегося на аноде в результате синтеза электролитов, имеют пластинчатую форму, а частицы катодного порошка показанные на рисунке 4—дендритную форму с наноразмерными структурными элементами [6]. Гранулометрические исследования составов получаемых порошков показали, что при проведении электролиза в отсутствии мембраны на гистограммах распределения частиц порошков наблюдается максимумы в двух областях 2–5 мкм и 25–35 мкм. Это связано с образованием двух видов частиц — анодных и катодных, соотношение которых определяется условиями получения. Такое сочетание частиц в дальнейшем обеспечивает более равномерное распределение меди в порошковой композиции с железом.



А Б

Рис.4. Микрофотографии порошков, полученных из медно-аммиачных растворов в виброусловиях

Полученный медный порошок использовали в качестве легирующей добавки для изготовления порошкового антифрикционного материала на основе железа ПА-ЖД. Для исследования микроструктуры полученного материала использовали микроскоп Альтами МЕТ 3, для испытания образцов на трение —универсальную испытательную машину МИ-1. Для проведения испытаний на трение были использованы методики, описанные в [9]. Твердость измеряли по методу Бринелля стальным шариком диаметром 5 мм.

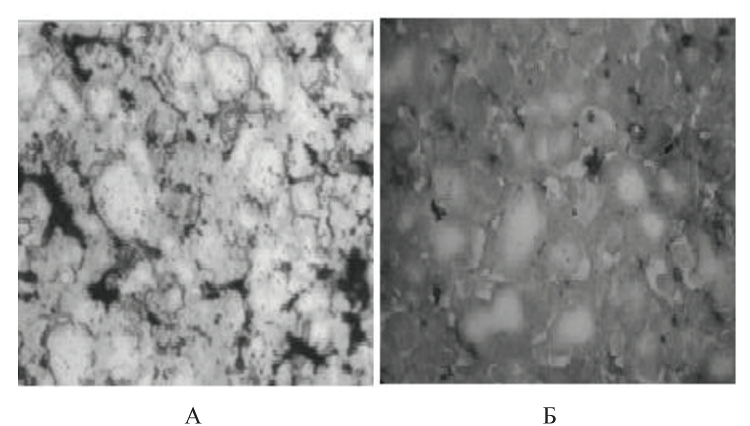
Использование катодных порошков меди, полученных из медно-аммиачных растворов, повышает твердость спеченных порошковых материалов на основе железа на 6,7% (при доверительном интервале в относительном выражении 1,6%) при одновременном снижении износа на трение, по сравнению с материалами, легированными порошком марки ПМС-1 на 11,7% (при доверительном интервале 6% в относительном выражении) (табл. 2).

Таблица 2

Результаты испытаний на трение спеченных материалов

Вид материала	Твердость, HRB	Износ, мм
Материал, легированный порошком марки ПМС-1	59±1	0,085±0,005
Материал, легированный катодным порошком, полученным из медно-аммиачного раствора	63±1	0,075±0,005

Эффект улучшения эксплуатационных свойств образцов, легированных порошком меди, полученным из медно-аммиачного раствора, можно связать с более равномерным распределением меди по границам зерен железа вследствие увеличения дисперсности медного порошка (рис.5).



А Б

Рис.5. Микроструктура материалов, легированных порошком марки ПМС-1, полученным из сульфатного электролита (А), и катодным порошком, полученным из медно-аммиачного раствора (Б).
Увеличение в 640 раз

Выводы. Применение виброкатода в медно-аммиачных растворах позволяет интенсифицировать процесс за счет снижения толщины диффузионного слоя в 3,6–3,8 раза. Полученный ультрадисперсный медный порошок обладает улучшенными физико-химическими характеристиками (отсутствие примесей, снижение среднего размера частиц до 26–28 мкм). При этом реализуется возможность повышения производительности более чем в 2,5 раза по сравнению с

промышленно-применяемыми способами получения электролитических порошков. Установлено, что применение медных и многокомпонентных медьсодержащих порошков, полученных из медно-аммиачных растворов, в качестве легирующей добавки к спеченным материалам на основе железа, позволяет повысить твердость и снизить износ за счет равномерного распределения фаз с высоким содержанием меди.

На основе результатов исследований процессов получения медных и многокомпонентных порошков из медно-аммиачных растворов разработаны технологические рекомендации, направленные на создание методик и высокопроизводительных ресурсосберегающих технологий электрохимического синтеза ультрадисперсных медных и многокомпонентных железо-медных порошков. Предлагаемые способы электрохимического синтеза позволяют значительно улучшить эксплуатационные свойства спеченных порошковых композиций за счет увеличения дисперсности и более равномерного взаимного распределения железа и меди в объеме порошкового материала. Значимым результатом являются экономически эффективные технологии утилизации медьсодержащих вторичных сырьевых ресурсов, что имеет большое экологическое значение.

Библиографический список

1. Способ получения медного порошка электролизом из сульфатных электролитов и устройство для его осуществления : патент 2022717 Рос. Федерация : B 22 F 9/16, B 22 F 9/18, B 22 F 9/02 / Баимбетов Б.С. [и др.] 5021033/02; заявл. 03.07.1991; опубл. 15.11.1994. Бюл. № 16. — 3 с.

2. W. He, Characterization of ultrafine copper powder prepared by novel electrodeposition method / W. He, X.C. Duan, L. Zhu. — J. Centr. South Univ. Technol. 16 (2009) 708–712.

3. R.K. Nekouei, F. Rashchi, A.A. Amadeh, Using design of experiments in synthesis of ultra-fine copper particles by electrolysis, Powder Technol. 237 (2013) 165–171.

4. M.G. Pavlovic, Lj. Pavlovic, V.Maksimovic, N. Nikolic, K. Popov, Characterization and morphology of copper powder particles as a function of different electrolytic regimes, Int. J. Electrochem. Sci. 5 (2010) 1862–1878.

5. M.Y.Wang, Z.Wang, Z.C. Guo, Preparation of electrolytic copper powders with high current efficiency enhanced by super gravity field and its mechanism, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 20 (2010) 1154–1160.

6. Рыбалко, Е. А. Электрохимическое получение ультрадисперсных многокомпонентных порошков в процессах утилизации медьсодержащих материалов : автореф. дис. … канд. техн. наук / Е. А. Рыбалко. — Новочеркасск, 2013. — 16с.

7. А.с. 219301 СССР, МПК B 06b Излучатель низкочастотных колебаний в жидкую среду / А.В.Бондаренко, — № 1089144/26–10; заявл. 09.07.66; опубл. 30.05.68, Бюл. № 18. — 4 с. : ил.

8. Дорофеев, Ю. Г. Получение медных порошков из аммиакатных электролитов и их свойства / Ю. Г. Дорофеев [и др.] // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2012. — № 3. — С. 3–7.

9. Горленко, А. О. Триботехнические испытания подшипников скольжения / А. О. Горленко, М. Л. Клюшников // Наука и производство : сб. трудов Международной научно-практической конференции — Брянск. — 2009. — ч. 2. — С. 22–23.

References

1. Baimbetov, B.S., et al. Sposob polucheniya mednogo poroshka elektrolizom iz sul'fatnykh elektrolitov i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya: patent 2022717 Ros. Federatsiya: B 22 F 9/16, B 22 F 9/18, B 22 F 9/02. [Technique for electrolyzing copper powder from sulphate electrolytes and device for its implementation.] RF Patent no. 2022717, 1994 (in Russian).

2. He, W., Duan, X.C., Zhu, L. Characterization of ultrafine copper powder prepared by novel electrodeposition method. J. Centr. South Univ. Technol., 2009, vol. 16, pp. 708–712.

3. Nekouei, R.K., Rashchi, F., Amadeh, A.A. Using design of experiments in synthesis of ultra-fine copper particles by electrolysis. Powder Technol. 2013, vol. 237, pp. 165–171.

4. Pavlovic, M.G., Pavlovic, Lj., Maksimovic, V., Nikolic, N., Popov, K. Characterization and morphology of copper powder particles as a function of different electrolytic regimes. Int. J. Electrochem. Sci., 2010, vol. 5, pp. 1862–1878.

5. Wang, M.Y., Wang, Z., Guo, Z.C. Preparation of electrolytic copper powders with high current efficiency enhanced by super gravity field and its mechanism. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2010, vol. 20, pp. 1154–1160.

6. Rybalko, E.A. Elektrokhimicheskoe poluchenie ul'tradispersnykh mnogokomponentnykh poroshkov v protsessakh utilizatsii med'soderzhashchikh materialov : avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk. [Electrochemical production of ultrafine multicomponent powders in the process of copper materials recycling: Cand.Sci. (Eng.) diss., author's abstract.] Novocherkassk, 2013, 16 p. (in Russian).

7. Bondarenko, A.V. Izluchatel' nizkochastotnykh kolebaniy v zhidkuyu sredu . [Emitter of low-frequency oscillations in the liquid medium.] USSR Author's Certificate no. 1089144/26–10, 1968 (in Russian).

8. Dorofeyev, Yu.G., et al. Poluchenie mednykh poroshkov iz ammiakatnykh elektrolitov i ikh svoystva. [Copper powder production from ammoniate electrolytes and their properties.] Izvestia: Powder Metallurgy and Functional Coatings, 2012, no. 3, pp. 3–7 (in Russian).

9. Gorlenko, A.O., Klyushnikov, M.L. Tribotekhnicheskie ispytaniya podshipnikov skol'zheniya. [Tribological tests of plain bearings.] Nauka i proizvodstvo: sb. trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. [Science and Industry: Proc. Int.Sie.-Pract. Conf.] Bryansk, 2009, part 2, pp. 22–23 (in Russian).

Поступила в редакцию 16.02.2015
Сдана в редакцию 18.02.2015
Запланирована в номер.30.06.2015

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 004.428+004.94 DOI 10.12737/12593

Особенности реализации механизма подключения библиотек сторонних разработчиков в информационной системе «Канал»*

Н. С. Могилевская[1], К. А. Чугунный[2]**
[1,2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Implementation features of the third-party DLL connection mechanism in the information system «Channel»***

N. S. Mogilevskaya[1], K. A. Chugunniy[2 **]
[1,2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель работы состоит в создании способа применения механизма динамически подключаемых библиотек при априорно неизвестном количестве и типе параметров экспортируемых функций подключаемых библиотек на примере информационной системы «Канал». Система «Канал» позволяет моделировать цифровые помехоустойчивые каналы связи и решать задачу согласования канала связи и алгебраического метода помехоустойчивой защиты этого канала. Главная особенность системы состоит в том, что использовать ее могут как исследователи, не обладающие навыками программирования, так и специалисты с квалификацией в области программирования вычислительных средств. Первые могут использовать существующий функционал системы, а вторые — дополнительно разрабатывать и подключать к системе собственные библиотеки, расширяющие возможности информационной системы. Описаны проблемы, возникающие при наращивании функционала этой информационной системы сторонними разработчиками методом динамически подключаемых библиотек. Основную сложность составляет априорная неопределенность в названиях, параметрах и типах параметров внешних функций подключаемых библиотек. Метод решения проблемы подключения библиотек сторонних разработчиков состоит в абстрагировании основной программы от данных, используемых подключаемыми модулями, унификации требований к внешним библиотекам, снабжении каждой библиотеки специальным файлом описания и создании для каждой библиотеки процедуры редактирования введенных параметров. Результатом работы является качественная работа системы «Канал» с внешними библиотеками, при соблюдении разработчиками этих библиотек ряда соглашений. Сделаны выводы о том, что полученное решение может быть использовано в других системах.

Ключевые слова: информационная система, ИС «Канал», динамически подключаемые библиотеки, помехоустойчивый канал связи, расширение системы, внешние функции, сторонние разработчики, DLL.

The work objective is to develop a method of the dynamic link libraries mechanism application with aprior unknown number and type of the exported functions parameters of DLL on the example of the information system “Channel”. The system “Channel” allows simulating the noise-immune digital communication channels and solving the problem of matching the communication channel and the algebraic method of the jamproof protection of this channel. The main feature of the system is that it can be used not only by the researchers who do not have programming skills, but also by experts in the computing aids programming. The first-mentioned group can use the existing system software, and experts can further develop and connect their own libraries to expand the capabilities of the information system. Problems that arise when expanding the information system functional by the third-party developers through the DLL technique are described. The main difficulty is the prior uncertainty in the names, parameters, and parameter types of the DLL external functions. The problem-solving technique for the of third-party libraries connection developers is the master program abstraction from the data used by the plugins, the unification of requirements to the external libraries, the supply of each library with a special description file, and the creation of the input parameter editing procedure for each library. The result is a quality operation of the information system “Channel” with the external libraries under observing a number of agreements by the DLL developers. The conclusion is made that the resulting solution can be used in other systems as well.

Keywords: information system, “Channel” IS, dynamic link libraries, noiseless communication channel, system expansion, external function, third-party developers, DLL.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: broshka@nm.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. Имитационное моделирование помехоустойчивых каналов связи является весьма распространенным и зачастую единственно возможным способом решения сложной многопараметрической задачи теории связи, состоящей в согласовании алгебраического помехоустойчивого кодека и канала связи [1, 2]. Обычно имитационные модели реализуются в виде программных средств. Большинство таких средств создаются для решения одной узкой задачи и используются очень короткое время только самими создателями. Наиболее предпочтительным вариантом реализации имитационной модели являются программные средства с расширяемым функционалом.

Примерами таких систем с расширяемым функционалом являются, например, российская разработка «Имитатор» [3] и система Matlab [4, 5]. Указанные системы обладают рядом несомненных достоинств. Однако с точки зрения их использования для решения задачи согласования кодека и канала эти системы имеют существенные недостатки. Так, расширения программного средства «Имитатор» разрабатываются только ее авторами, а система Matlab требует от всех пользователей навыков программирования.

Информационная система «Канал» [6–8] представляет собой специально разработанное программное средство, позволяющее экспериментально оценивать корректирующие способности помехоустойчивых кодов в условиях различной помеховой обстановки и решать задачу согласования алгебраического помехоустойчивого кодека и канала связи. Ее выгодное отличие от известных аналогов заключается в том, что использовать ее могут как исследователи, не обладающие навыками программирования, так и специалисты с квалификацией в области программирования вычислительных средств. Первые могут использовать существующий функционал системы, а вторые дополнительно могут разрабатывать и подключать к системе собственные библиотеки, расширяющие возможности информационной системы. Наличие механизма подключения библиотек сторонних разработчиков очень важно, так как это дает возможность системе развиваться и быть использованной для решения множества задач.

Подключение новых библиотек к информационной системе можно выполнять с использованием хорошо известного механизма динамически подключаемых библиотек — DLL (Dynamic-Link Library) [9]. Механизм DLL позволяет эффективно наращивать возможности программы за счет программных модулей, реализованных различными разработчиками. Отметим, что исходный код для такой библиотеки может быть создан на многих языках программирования. В тексте DLL-модуля программист располагает множество процедур и функций, реализующих необходимые алгоритмы. Экспортируемые функции, т.е. функции, которые будут использованы внешней программой, указываются с использованием специальной директивы. Основная программа при необходимости загружает в память компьютера DLL-модуль и после этого она может вызывать экспортируемые функции из этого модуля.

Ограничением на использование динамически подключаемых библиотек является тот факт, что программе, вызывающей подключаемую библиотеку, априорно должен быть известен список экспортируемых функций во всех подключаемых модулях, а также число, тип и область допустимых значений параметров вызываемых функций. При реализации информационной системы «Канал» возникает ситуация, при которой сведения о списках параметров априорно не известны. Следовательно, использовать механизм DLL напрямую не удается и требуется разработать модифицированный способ его применения. Рассмотрим ниже проблемы, возникшие при подключении библиотек сторонних разработчиков в ИС «Канал», и найденные методы их решения.

Схема модели канала связи, реализуемая в ИС «Канал». В информационной системе «Канал» [7, 8] механизм подключаемых библиотек используется в ее части, отвечающей за моделирование канала связи. Схема прохождения данных в модели канала представлена рис. 1: данные из источника сообщений обрабатываются помехоустойчивым кодером канала, далее они попадают в канал с помехами, после чего зашумленные данные восстанавливаются в декодере канала и результат передается в приемник сообщений. Некоторый набор алгоритмов, реализующих кодирование и декодирование данных, а также их зашумление распространяется вместе с программным средством, реализующим информационную систему «Канал». Расширение набора этих алгоритмов может быть проведено сторонними разработчиками и выполнено в виде подключаемых модулей. Функционал блоков «Кодер канала», «Линия связи с шумом» и «Декодер канала» может быть реализован в виде подключаемых библиотек.

Отметим, что кодер и декодер канала в рассматриваемой системе могут реализовывать не только один алгоритм кодирования или декодирования, но и представлять собой комбинацию из конечного множества помехоустойчивых кодеков и перемежителей. Такие комбинации называются каскадом. Пример организации каскада представлен на рис. 2. Символами π и π^{-1} на рис. 2 обозначены перемежители и деперемежители, соответственно. Отметим, что пара «Кодер i» и «Декодер i», а также перемежитель «π» и деперемежитель «π^{-1}» должны быть согласованы, т.е. реализовывать связанные алгоритмы.

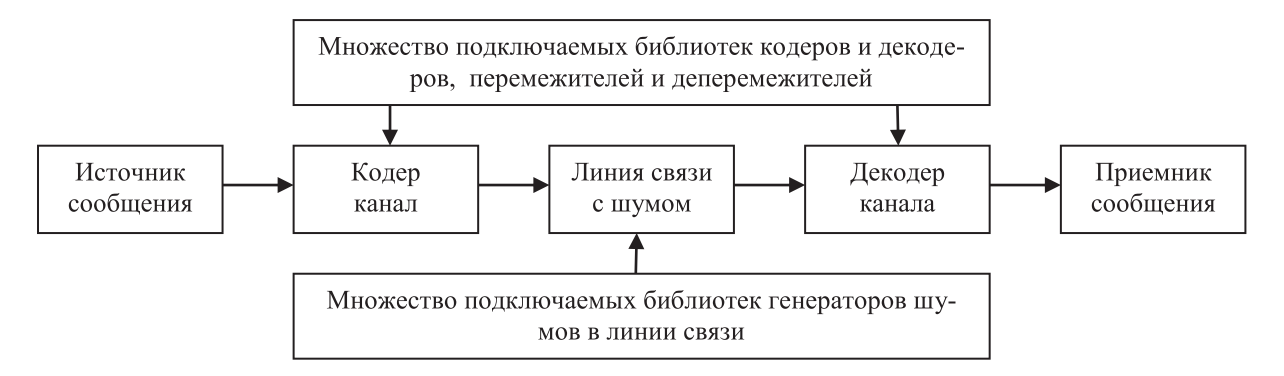


Рис. 1. Схема имитационной модели канала связи

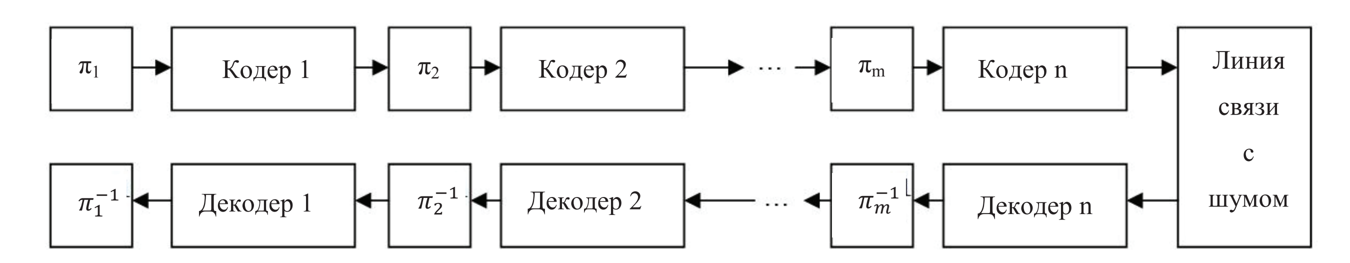


Рис. 2. Пример организации каскада из помехоустойчивых кодеков и перемежителей

Проблема подключения библиотек сторонних разработчиков в ИС «Канал». Как было отмечено выше, в ИС «Канал» рассматриваются три типа подключаемых библиотек в зависимости от их назначения. А именно, библиотека может содержать помехоустойчивый кодек, перемежитель или генератор шума. В зависимости от типа библиотеки ее создателем, согласно технологии DLL, должны быть реализованы определенные интерфейсные функции, обеспечивающие связь с ИС «Канал». Сложность сопряжения этих функций с ИС «Канал» состоит в том, что заранее неизвестны число и типы параметров этих функций, а также область их допустимых значений. Например, в библиотеке, реализующей помехоустойчивый кодек, обязательно должны быть функции кодирования и декодирования. Так, в спецификации функции кодирования двоичным кодом Хемминга [2] достаточно указать только один числовой параметр, который полностью определяет все параметры кода и алгоритма кодирования, а число параметров в спецификации функции кодирования произвольным циклическим кодом [2] зависит от степени порождающего полинома, мощности используемого поля Галуа и может достигать нескольких десятков значений. Аналогичная ситуация широкого диапазона возможного количества и типов параметров функций, вызываемых из подключаемых библиотек, наблюдается и для библиотек, реализующих потоки ошибок и алгоритмы перемежения.

Укажем желаемые свойства искомого технического решения проблемы подключения библиотек сторонних разработчиков.

Самостоятельное подключение новых модулей пользователями и разработчиками. Подключение стороннего модуля, реализующего произвольные алгоритмы кодирования, зашумления или перемежения, вне зависимости от списка параметров функций, экспортируемых этими модулями, должно производиться без взаимодействия с авторами основной программы ИС «Канал».

Простота и удобство создания подключаемых модулей. Очевидно, что чем больше ограничений и требований по отношению к подключаемым библиотекам необходимо учитывать их разработчикам, тем сложнее разработка внешних модулей для программы и тем меньше разработчиков согласиться их создавать. Следовательно, сложность создания подключаемых модулей для ИС «Канал» не должна значительно превосходить сложность программной реализации алгоритмов кодирования, перемежения или зашумления.

Корректное взаимодействие основной программы с подключаемыми модулями. Программа должна корректно работать с подключаемыми кодеками, вызывать их, редактировать параметры, обрабатывать исключительные ситуации.

Удобство для пользователя. С точки зрения пользователя не должна различаться работа с функционалом подключаемых модулей и функционалом основной программы. А именно, должно быть реализовано: удобное расположение компонентов на формах ввода параметров и снабжение их контекстной помощью; проверка введенных параметров на соответствие разрешенным диапазонам; описание функционала подключаемых библиотек в общем справочном разделе основной программы.

Хранение параметров и результатов экспериментов в базе данных. В базе данных нужно хранить все условия и результаты экспериментов, включая список кодеров и их параметры. Необходимо учитывать, что внешние модули, реализующие какие-либо алгоритмы, могут быть отключены или заменены.

Техническое решение проблемы подключения библиотек сторонних разработчиков состоит в абстрагировании основной программы от данных, используемых подключаемыми модулями, унификации требований к подключаемым библиотекам, снабжении каждой библиотеки специальным файлом описания и создании для каждой библиотеки процедуры редактирования введенных параметров. Рассмотрим элементы найденного решения подробнее.

Унифицированные требования к подключаемым библиотекам. Вне зависимости от реализуемых алгоритмов (кодирование и декодирование, перемежение и деперемежение или построение потока ошибок) ко всем библиотекам предъявляется ряд одних и тех же требований. Так все процедуры и функции внутри подключаемых библиотек, должны использовать соглашение cdecl для своего вызова. Каждая функция обязана хранить данные для своей работы (параметры для алгоритмов и промежуточные данные) в динамически выделяемой области памяти. Взаимодействие с основной программой основано на том, что ИС «Канал» манипулирует указателем на эту область памяти, вне зависимости от хранящихся в ней данных. Для работы ИС «Канал» с этим указателем разработчикам подключаемых библиотек необходимо написать пять сервисных функций, выполняющих базовые функции:

- создание записи (как структуры данных) для хранения параметров функций, вызываемых из подключаемой библиотеки;
- удаление записи;
- создание дубликата записи (дубликат используется для быстрого построения плана эксперимента);
- пользовательский ввод параметров с проверкой корректности;
- получение текстового описания параметров модуля.

Так как между основными элементами модели канала данные передаются в виде файлов конечной длины, то функции кодирования и декодирования, перемежения и деперемежения, а также внесения шума должны иметь два обязательных параметра типа pchar и указывающих на названия входного и выходного файлов, далее при необходимости располагается указатель на запись с входными параметрами алгоритма.

Ввод параметров алгоритмов. Входные значения для функций из внешних библиотек устанавливаются пользователями ИС «Канал» при указании параметров проводимых экспериментов во время выполнения основного модуля программы. Так как число параметров, их типы и множество допустимых значений могут быть произвольными, то создавать специальные пользовательские формы редактирования параметров должны разработчики сторонних модулей. Им известен диапазон допустимых значений параметров и только они могут удобно разместить компоненты редактирования этих параметров на пользовательской форме, снабдив их сопутствующей справочной информацией.

Вид процедуры редактирования данных жестко регламентируется. Например, на языке Pascal: procedure ParamInput (AppHand:THandle; pData:pointer); cdecl; export. Параметры функции: AppHand — дескриптор главного окна приложения; pData — указатель на тип Record, содержащий параметры алгоритма. Процедура редактирования данных не завершает свое выполнение до тех пор, пока пользователь корректно не введет все необходимые параметры.

Файл описания подключаемого модуля. Для повышения дружелюбности интерфейса ИС «Канал» в части работы с библиотеками сторонних разработчиков каждая библиотека должна быть снабжена специальным файлом описания, название которого совпадает с названием библиотеки, и имеет расширение ini. Такие файлы формируют разработчики подключаемой библиотеки. Использование этих файлов позволяет предоставлять справочную информацию о подключаемых модулях, обеспечивать возможность редактирования пользователем названий и описаний подключаемых кодеков, перемежителей и шумов, которые затем будут отображаться в пользовательском интерфейсе ИС «Канал». Файл описания является текстовым, его редактирование возможно в любом редакторе с поддержкой кодировки Windows-1251 (например, в стандартной программе ОС Windows «Блокнот»). Все изменения, сделанные в файлах описания, вступают в силу после перезагрузки программы, реализующей ИС «Канал».

Файл описания может состоять из нескольких блоков, каждый из которых посвящен описанию одного реализуемого библиотекой алгоритма (кодека, перемежителя или генератора шума). На рис. 3 представлен пример одного блока файла описания для внешней библиотеки, реализующей алгоритмы генерации потоков ошибок. Комментарии в каждой строке помещены после символа «%». Первая строка блока описания содержит служебное название алгоритма, помещенное в квадратные скобки. Внутри файла это название должно быть уникальным и не может быть пустой строкой. Далее до следующего служебного названия алгоритма или до конца файла идут параметры этого алгоритма. Каждый параметр находится в отдельной строке, и представляет собой выражение вида: <зарезервированное слово> = <значение>. Параметр «Type» может принимать одно из трех значений: 1 — для кодеров и декодеров, 2 — для перемежителей и деперемежителей, 3 — для генератора шума. Параметр «Name» является строкой символов неограниченной длины, в него записывается имя алгоритма, которое будет отображаться в пользовательском интерфейсе ИС «Канал». «Hint» — строка-подсказка, которая отображается в программе, когда курсор несколько секунд находится над

списком алгоритмов. «Description» — содержит справочную информацию по алгоритму, длина этого описания не ограничена. Справочная информация отображается при выборе меню «Справка» в пользовательском интерфейсе ИС «Канал». «DataControlDll» — имя библиотеки, содержащей процедуру редактирования данных и форму для ввода параметров алгоритма пользователем. Если параметр «DataControlDll» пуст, то считается, что форма находится внутри модуля, которому соответствует файл описания. «EditData» — имя экспортируемой процедуры «редактирования данных». «UniqueID» — уникальный идентификатор алгоритма, который в файл описания вставляет информационная система. «CreateData» — имя сервисной функции создания новой записи с данными. «DuplicateData» — имя сервисной функции создания дубликата записи. «DescriptionData» — имя сервисной функции, которая получает текстовое описание параметров модуля. «DisposeData» — имя сервисной функции уничтожения записи с данными.

Остальные параметры, представляемые в файле описания, зависят от типа алгоритма, указанного в «Type». Так для генераторов шумов необходимо указать «FuncName» — имя экспортируемой функции генератора шумов из DLL-библиотеки. Для кодеков и перемежителей необходимо указать: «Coder» — имя экспортируемой из DLL-библиотеки функции кодирования или перемежения, «Decoder» — имя экспортируемой функции декодирования или деперемежения.

```
[GenerationNoise]                          %  Служебное название алгоритма
Type=3                                     %  Тип алгоритма – генератор шума
Name=Равномерный шум                       %  Название алгоритма, которое будет видно
                                           %  в интерфейсе пользователя ИС «Канал»
Hint=Функция генерации простого шума       %  Контекстная подсказка
Description=В поток данных вносится равномерно распределенные двоичные ошибки с постоянной вероятно-
стью p.                                    % Описание для файла-справки
FuncName=GenerationNoise                   % Имя функции генерации шума
DataControlDll=datacontrol.dll             % Процедура редактирования данных
                                           % находится  в библиотеке datacontrol.dll
EditData=ShowForm                          % Название формы из datacontrol.dll для ввода
                                           % пользователем параметров алгоритма
CreateData=DataCreate                      % имя сервисной функции создания
                                           % новой записи с данными.
DuplicateData=DataDuplicate                % имя сервисной функции создания дубликата записи
DescriptionData=DataDescription            % имя сервисной функции получения текстового описания
                                           % параметров модуля
```

Рис. 3. Пример блока файла описания

Алгоритм подключения внешних модулей. При каждом запуске исполняемого файла ИС «Канал» происходит поиск подключаемых библиотек в специальной директории «plugins», которая размещается в папке с программой. Схематично алгоритм подключения библиотек можно представить в следующем виде:

1. Просматриваем файлы в папке plugins с подключаемыми библиотеками.
2. Если находим файл с расширением dll, для которого существует файл описания, т.е. файл с таким же именем и расширением ini, то читаем файл описания и получаем из него данные о находящихся внутри модуля кодеках, перемежителях, генераторах шумах и именах функций, реализующих эти алгоритмы. Кроме этого, из файла описания извлекаются имя функции ввода и контроля данных, имена сервисных функций и имя библиотеки, в которой они находятся.
3. Загружаем необходимые библиотеки в память.
4. Если в пунктах 2–3 не было ошибок, добавляем названия внешних функций, полученных из подключенных библиотек в специальный список, который формируется в основном модуле ИС «Канал» и который содержит названия функций доступных для дальнейшего использования
5. Переходим к следующему файлу в папке plugins.

Недостатки предложенного технического решения. Основываясь на опыте многократного использования ИС «Канал» как его авторами, так и сторонними разработчиками и исследователями, можно выделить два основных недостатка данной системы.

Во-первых, для стороннего разработчика появляются дополнительные сложности по написанию небольших вспомогательных функций. Однако их можно считать незначительными в сравнении с обращением к авторам программы за изменениями или с созданием остального функционала, реализованного в ИС «Канал». К тому же данный недостаток системы частично решается предоставлением шаблонов и готовых примеров для разработчиков.

Во-вторых, в данной системе затруднительным является построение сложных выборок из базы данных с результатами проведенных имитационных экспериментов. Так как основная программа ИС «Канал» манипулирует параметрами функций из внешних библиотек как с областью памяти и не выделяет отдельные элементы из списка параметров, то в базе данных параметры алгоритмов хранятся в виде длинной строки, что затрудняет сортировку результатов экспериментов по параметрам алгоритмов. Разделение строки параметров на части и организация в базе данных соответствующих полей, содержащих эти параметры, невозможны из-за большого многообразия таких параметров в различных алгоритмах. Данная проблема частично решается грамотным составлением плана экспериментов и стандартной в ИС «Канал» функцией построения графиков по заданным критериям.

Заключение. За время своего существования ИС «Канал» неоднократно успешно использовалась как в учебном процессе, так и в научно-исследовательских целях. Некоторые примеры использования информационной системы «Канал» можно найти в работах [2, 10, 11]. Считаем, что реализация механизма работы с модулями, используемая в «ИС Канал» получилась удачной. Этот механизм обладает практически всеми желаемыми свойствами, перечисленными выше. Положительные результаты использования ИС «Канал» подтвердили тот факт, что ее структура с точки зрения программной реализации выбрана грамотно и качественно реализована. Разработанный способ подключения модулей сторонних разработчиков в ситуации, когда параметры внешних функций заранее не известны, можно использовать и в других проектах.

Библиографический список

1. Деундяк, В. М. Методы оценки применимости помехоустойчивого кодирования в каналах связи / В. М. Деундяк, Н. С. Могилевская. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2007. — 86 с.

2. Деундяк, В. М. Методы помехоустойчивой защиты данных / В. М. Деундяк, А. Э. Маевский, Н. С. Могилевская. — Ростов-на-Дону : Изд-во Южного федерального университета, 2014. — 309 с.

3. Имитатор цифрового канала передачи данных (ChannelSim) : свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин. — № 2005611304 ; дата регистрации 31.05.05.

4. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. — Санкт-Петербург : Питер, 2011. — 758 с.

5. Giordano, A. Modeling of Digital Communication Systems Using Simulink / A. Giordano, A. Levesque // NY: John Wiley & Sons, Inc., 2015. — 380 p.

6. Информационная система «Канал» : свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ / Н. С. Могилевская, К. А. Чугунный. — № 2008614602 ; дата регистрации 24.09.2008 г.

7. Могилевская, Н. С. О развитии информационной системы «Канал» / Н. С. Могилевская, К. А. Чугунный // Системный анализ, управление и обработка информации : сб. трудов 5-го междунар. семинара. — Ростов-на-Дону, 2014. — С. 411–417.

8. Могилевская, Н. С. Информационная система исследования эффективности алгебраических схем помехоустойчивой защиты в системах передачи данных [Электронный ресурс] / Н. С. Могилевская // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1. — Режим доступа : www.science-education.ru / 121–17127 (дата обращения : 16.02.2015).

9. Архангельский, А. Я. Программирование в Delphi для Windows / А. Я. Архангельский. — Москва : Бином-Пресс, 2010. — 1248 с.

10. Могилевская , Н. С. Экспериментальное исследование декодеров кодов Рида-Маллера второго порядка / Н. С. Могилевская, В. Р. Скоробогат, В. С. Чудаков // Вестник Дон. гос. тех. ун-та. — 2008. — Т. 8, № 3. — С. 231–237.

11. Могилевская, Н. С. Корректирующая способность декодера мягких решений троичных кодов Рида-Маллера второго порядка при большом числе ошибок / Н. С. Могилевская // Вестник Дон. гос. тех. ун-та. — 2015. — № 1. — С. 121–130.

References

1. Deundyak, V.M., Mogilevskaya, N.S. Metody otsenki primenimosti pomekhoustoychivogo kodirovaniya v kanalakh svyazi. [Methods for evaluating the applicability of error-correcting coding in communication channels.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2007, 86 p. (in Russian).

2. Deundyak, V.M., Mayevskiy, A.E., Mogilevskaya, N.S. Metody pomekhoustoychivoy zashchity dannykh. [Methods of noise-immune data protection.] Rostov-on-Don: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2014, 309 p. (in Russian).

3. Zolotarev, V.V., Ovechkin, G.V. Imitator tsifrovogo kanala peredachi dannykh (ChannelSim : svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM. [Digital data channel simulator (ChannelSim)] Certificate of state registration of computer programs no. 2005611304, 2005 (in Russian).

4. Sergiyenko, A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov. [Digital signal processing.] St. Petersburg: Piter, 2011, 758 p. (in Russian).

5. Giordano, A., Levesque, A. Modeling of Digital Communication Systems Using Simulink. NY: John Wiley & Sons, Inc., 2015, 380 p.

6. Mogilevskaya, N.S., Chugunniy, K.A. Informatsionnaya sistema «Kanal»: svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM. [Information system “Channel”.] Certificate of state registration of computer programs no. 2008614602, 2008 (in Russian).

7. Mogilevskaya, N.S., Chugunniy, K.A. O razvitii informatsionnoy sistemy «Kanal». [On the development of the information system “Channel”.] Sistemnyy analiz, upravlenie i obrabotka informatsii: sb. trudov 5-go mezhdunar. seminara. [System analysis, management and information processing: Proc. 5th Int. Workshop.] Rostov-on-Don, 2014, pp. 411–417 (in Russian).

8. Mogilevskaya, N.S. Informatsionnaya sistema issledovaniya effektivnosti algebraicheskikh skhem pomekhoustoychivoy zashchity v sistemakh peredachi dannykh. [Information system research efficiency algebraic error correction scheme in data transmission systems.] Modern Problems of Science and Education, 2015, no. 1. Available at: www.science-education.ru (accessed: 16.02.2015) (in Russian).

9. Arkhangelskiy, A.Y. Programmirovanie v Delphi dlya Windows. [Programming in Delphi for Windows.] Moscow: Binom-Press, 2010, 1248 p. (in Russian).

Mogilevskaya, N.S., Skorobogat, V.R., Chudakov, V.S. Eksperimental'noe issledovanie dekoderov kodov Rida-Mallera vtorogo poryadka. [Experimental research of second-order Reed-Muller codes.] Vestnik of DSTU, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 231–237 (in Russian).

10. Mogilevskaya, N.S. Korrektiruyushchaya sposobnost' dekodera myagkikh resheniy troichnykh kodov Rida-Mallera vtorogo poryadka pri bol'shom chisle oshibok. [Correcting capacity of soft-decision decoder of ternary Reed – Muller second-order codes with a large number of errors.] Vestnik of DSTU, 2015, no. 1, pp. 121–130 (in Russian).

Поступила в редакцию 21.04.2015
Сдана в редакцию 23.04.2015
Запланирована в номер 25.06.2015

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 517.977:62 DOI 10.12737/12596

Исследование эффективности парадигмы факторной оценки знаний на примере тестирования студентов по теории автоматического управления*

Р. А. Нейдорф[1], **Е. Н. Обухова**[2]**
[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Research of the factorial knowledge assessment paradigm efficiency illustrated by an example of testing students in the automatic control theory***

R. A. Neydorf [1], **E. N. Obukhova**[2]**
[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Разработаны актуальный алгоритм построения тестовых материалов и методика оценивания результатов тестирования, позволяющие сочетать высокую оценочную способность и объективность тестов. Тестовую систему в таком случае можно рассматривать как аппарат оценивания уровня знаний при изучении соответствующих модулей. Для систематизации знаний производится декомпозиция знаний на множество разделов. При этом каждому разделу сопоставляется множество подразделов, которое, в свою очередь, состоит из подмножества вопросов, ответы на которые раскрывают уровень знаний каждого раздела. Задание теста формулируется таким образом, что при ответе на него должен быть дан набор ответов, раскрывающих уровень знания определенного подраздела. Поскольку процесс разработки тестового вопроса рассматривается как построение многофакторной зависимости, то предлагается к его построению подойти с позиции планирования многофакторных экспериментов. В этом случае множество ответов представляется как набор факторов, принимающих определенные значения. При их варьировании на двух уровнях, задача сводится к построению эксперимента, реализующего все возможные сочетания факторов, т.е. к полному факторному эксперименту. Предложена методика применения технологии планирования двухуровневых многофакторных экспериментов, позволяющих формализовать оценку частично неполных знаний и реализацию формирования многофакторных тестов различной сложности. Для иллюстрации данной методики рассмотрены примеры построения тестов для дисциплины «Теория автоматического управления», оценивающих степень сформированности уровня знаний. Статистическая обработка результатов тестирования показала уровень знаний испытуемых, а также степень доверия к этим знаниям.

Ключевые слова: тестирование, фактор знания, тестовый вопрос, оценка ответа, вариативность ответа, неравномерность знаний.

An algorithm for constructing test materials and the test results evaluation techniques that allow combining high estimate rate and test objectivity are developed. The test system in this case can be considered as an assessment tool for the knowledge level under investigating the appropriate modules. The decomposition of knowledge into lots of sections is conducted for the knowledge systematization. At that, each section is associated to a set of sub-sections which, in turn, consists of a subset of questions, the answers to which reveal the level of knowledge of each section. The test assignment is formulated in such a way that upon answer, a set of responses revealing the knowledge level of a certain subsection is to be given. Since the test development process is considered as a construction of multivariable dependence, it is proposed to approach the problem from the perspective of planning multifactor experiments. In this case, a set of answers is presented as a set of factors taking on certain values. With their varying on two levels, the problem is reduced to the construction of the experiment that implements all possible combinations of factors, i.e. to a complete factorial experiment. The technique of applying the technology of two-level multifactor experiment planning that allows formalizing the evaluation of partially incomplete knowledge, and implementing the formation of the multifactor tests of different kinds of complexity is offered. To illustrate this technique, the examples of the construction of tests for the discipline “Automatic control theory” assessing the degree of the knowledge level formation are considered. The statistical analysis of the test results has shown the knowledge level of the testees, as well as the credibility of this knowledge.

Keywords: testing, knowledge factor, test question, answer mark, answer variability, knowledge irregularity.

http://vestnik.donstu.ru

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: ran_pro@mail.ru, elena21@spark-mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. Проблема оценки и аттестации знаний студентов в условиях введения новых федеральных государственных образовательных стандартов является актуальной для всех российских ВУЗов. Особое внимание уделяется подходам и методам, позволяющим повысить эффективность использования имеющихся средств контроля знаний в условиях ограниченности материальных ресурсов [1–4].

Удобным и эффективным средством контроля знаний является тестирование [1, 2]. Несмотря на то, что тестовый контроль является одним из перспективных методов оценки знаний и определения уровня подготовки обучаемых, существует множество проблем, с которыми сталкивается преподаватель при внедрении его в учебный процесс. Эти проблемы связаны как с подготовкой тестов, так и с оценкой результатов тестирования [5, 6].

Одна из проблем связана со сложностью задачи составления тестов и создания достаточно развитых баз тестовых заданий по учебным дисциплинам. Это, конечно же, требует не только больших трудозатрат преподавателей, но и, в первую очередь, конкретной, доступной, и, желательно, универсальной методики построения тестов. Кроме того, желательно, чтобы эта методика была поддержана необходимым алгоритмическим и программным обеспечением с развитым, удобным и легко расширяемым интерфейсом [7–10].

Кроме этого, проблемой внедрения тестирования является ограниченность возможностей существующих тестовых технологий. Это относится и к целенаправленному формированию функционала и структуры тестов, и к оценке качественной составляющей знаний студентов, а также к процессу проверки и обработки результатов тестирования [11, 12].

Под качественной составляющей тестового задания здесь понимается возможность оценить степень усвоения учебного материала через выставляемую в виде балла оценку.

В частности, возможности теста расширяются, если используется несколько допустимых ответов с разной степенью достоверности ответа. Тогда, даже в случае дозволенности одного ответа на вопрос, тестируемый будет иметь оценку, выраженной долей полного знания [13]. Недостатком такого подхода является то, что он не защищен от угадывания правильного ответа. Тестируемый в этом случае, имея даже приблизительные знания о вопросе, с большой вероятностью имеет шанс угадать ответ с достаточно высокой оценкой. При этом невозможна оценка достоверности результата тестирования.

Эту проблему частично решают системы тестирования, допускающие выбор нескольких ответов, кажущихся тестируемому наиболее близкими к истине. Тогда возникает возможность оценить и уровень знаний, и степень их «размытости».

Общая характеристика проблемы. В работах авторов [14, 15] предложен и в значительной степени развит подход к описанной проблеме, а также даны различные частные примеры ее решения. В данном подходе авторы исходят из того, что основным постулатом тестирования является наличие вычлененного из изучаемого материала множества

$$Q = \{q_i | i = \overline{1,..n}\} \quad (1)$$

вопросов q_i, отражающих в совокупности его знание. Степень знания обучающимся вопроса q_i считается в процессе тестирования «фактором знания» (ФЗ) и обозначается x_i. Таким образом, тестирование превращается в факторный эксперимент, задача которого дать общую оценку совокупности знаний обучающимся изучаемого материала.

Факт знания тестируемого учебного материала отображается отношением

$$S : S(q_k) \Rightarrow a_k^t \in A^t = \{a_k^t \mid k = \overline{1,..n}\}, \quad (2)$$

Где A^t — множество правильных ответов a_k^t на вопросы $q_k \in Q$ в (1).

Естественно, факт незнания некоторых элементов изучаемого материала отображается отношением

$$S : S(q_l) \Rightarrow a_l^f \in A^f = \{a_l^f \mid l = \overline{1,..n}\}, \quad (3)$$

Где A^f — множество неправильных ответов a_l^f на вопросы $q_l \in Q$ в (1).

Вполне очевидно, что формулировки как правильного, так и неправильного ответа можно сформулировать различным образом. Это зависит от особенностей языковой среды, используемых для раскрытия знания исходных материалов (монографий, учебников), особенностей терминологии их авторов, субъективных особенностей преподавателя, разрабатывающего текст, и многого другого. Однако будем считать, что в конкретной образовательной среде сформированы свои конкретные q_k, q_l, a_k^t и a_l^f. Тогда ответ на вопрос по ФЗ можно считать абсолютной оценкой этого элемента знания.

Следовательно, мы имеем факт двоичной оценки ФЗ: «знает — не знает». Такой структуре теста соответствует двухбалльная оценка знаний: «0 – 1». Однако степень подготовленности тестируемого определяется совокупным множеством ответов на множество вопросов, оформленных на основе выделенных ФЗ изученного материала. Таким образом, степень знания одного вопроса тоже может быть разной и оценивать общую картину знания обучаемого сле-

дует по доле правильных ответов в полном множестве (1). Но тест, оформленный как последовательный процесс ответов по всем ФЗ даже небольшого раздела дисциплины получается слишком громоздким и утомительным.

В тестах, учитывающих этот фактор, множество Q целесообразно разбивать на подмножества Q_i, причем

$$\bigcap Q_i = Q, \quad (4)$$

где каждое подмножество Q_i представляет собой отдельный тестовый вопрос (ТВ), содержащий некоторое количество ФЗ, объединенное общей смысловой направленностью [16, 17].

Для выявления уровня знания каждого вопроса Q_i ему сопоставляется подмножество ответов A_i, причем

$$A_i = \left\{ A_{ij} \middle| \bigcap A_{ij} = (A_i^t, A_i^f) \right\}, \quad (5)$$

т.е. в множестве A_i ответов, предлагаемых на вопрос Q_i должны обязательно содержаться ответы содержащие все правильные (2) и все неправильные (3) ответы по ФЗ. В противном случае тест приобретает характер либо провокации, либо подсказки.

Остальные варианты ответов A_{ij} в (5) могут содержать некоторую долю неправильных ответов a_{ij}^f согласно (3). Если условная доля содержания правильной информации в таком ответе определена, то таким ответам можно сопоставить различные баллы, по которым можно оценивать степень знания вопроса. Комбинируя множества таких ответов можно составлять тесты, которыми можно оценивать «палитру» знаний [16, 17]. Условие (4) при этом обеспечивает совокупную оценку всего знания представленного множеством Q в (1).

Однако необходимо учесть еще один недостаток, свойственный традиционной структуре процесса тестирования. Выбор единственного ответа на тестовый вопрос значительно снижает эффективность даже предложенного выше усовершенствованного подхода к тестированию, т.к. при неполном знании возникает возможность проявления стойких эффектов, как угадывания, так и невезения. В работах [13–17] авторами предложен кардинально отличный подход — дать испытуемому возможность выбора нескольких вариантов ответов, которые на его взгляд кажутся наиболее близкими к правильным, не исключая права тестируемого выбрать один вариант ответа. Последнее характеризует уверенность его знания и соответствует выбору одного и того же ответа несколько раз.

Пример решения задачи тестирования знаний на основе парадигмы их факторной оценки. В работах [13–19] проанализированы возможности изложенного выше подхода и проверен ряд его положений. Практика использования факторных тестов показала, что наиболее эффективны для оценки знаний 3-факторные тесты, описанные и проиллюстрированные примерами в работах [18, 19]. В связи с этим в настоящей статье подробно рассматривается процесс составления, использования и последующей обработки именно 3-факторных тестов.

На основе методики составления многофакторных двухуровневых тестов были сконструированы тестовые задания и проведено тестирование для выявления знаний обучающихся, изучающих дисциплину «Теория автоматического управления». Каждому испытуемому было предоставлено девять различных трехфакторных ТВ Q_i, отражающих знание подраздела «Линейные непрерывные модели и характеристики систем управления». На каждый из этих ТВ по теории двухуровневого трехфакторного эксперимента можно составить комбинаторно различное множество A_i из восьми комплексных ответов A_{ij}. В данном примере испытуемым предлагалось множество A_i из четырех вариантов комплексных ответов A_{ij}, включающих различные совокупности ответов a_{ij}^t и a_{ij}^f. Такие тесты названы авторами усеченными трехфакторными (УШФ-тесты).

Тесты построены на основе сформулированных ФЗ, позволяющих, по мнению разработчиков, по факту понимания их сущности оценить уровень подготовки тестируемых по данной теме. В соответствии с изложенной в [18, 19] методикой каждое усеченное задание сформулировано как тестовый вопрос (ТВ), на который предлагалось четыре варианта ответов, выбранных случайным образом из полного трехфакторного тестового задания, содержащего 8 вариантов ответов.

Содержание этих усеченных трехфакторных ТВ приведены в таблице 1. В этой таблице использованы следующие обозначения: ПФ — передаточная функция; ДЗ — динамическое звено; ДУ — дифференциальное уравнение; ЛАЧХ — логарифмическая амплитудная частотная характеристика; ФЗ — фактор знания; АФЧХ — амплитудная фазовая частотная характеристика; АЧХ — амплитудная частотная характеристика; ФЧХ — фазовая частотная характеристика; ВЧХ и МЧХ — вещественная и мнимая частотные характеристики; ММ — математическая модель; ХП — характеристический полином.

Предложенные рассматриваемыми в таблице 1 вариантами ТВ правильные и неправильные ответы, относящиеся к включенным в него ФЗ, сведены в таблицу 2.

Таблица 1

Примеры усеченных трехфакторных тестовых вопросов

№ ТВ ($ТВ_i$)	№ ФЗ в $ТВ_i$	Формулировка фактора знания		Формулировка тестового вопроса
$ТВ_1$	x_1	связь структуры ПФ со структурой линейного ДУ ДЗ		По заданному ДУ следующего вида: $\frac{d^2y}{dt^2}+6\frac{dy}{dt}+5y=2\frac{dx}{dt}+12x$, описывающему, ДЗ найти передаточную функцию и определить ее нули и полюса.
	x_2	смысл понятия нуля ПФ		
	x_3	смысл понятия полюса ПФ		
$ТВ_2$	x_1	тип ДЗ	L(w) 40 20 lg k 0 +1 lgw	По виду асимптотической ЛАЧХ ДЗ $L(w)$, проходящей через точки 20 дБ и +1, выявить суть ФЗ.
	x_2	ПФ ДЗ		
	x_3	наклон ЛАЧХ ДЗ		
$ТВ_3$	x_1	ПФ в общем виде	L(w) 40 20 20 lg *k* +20 дБ\дек 0 1 lgw	По виду асимптотической ЛАЧХ ДЗ определить ПФ в общем виде, коэффициент усиления и значение постоянной времени.
	x_2	значение коэффициента усиления		
	x_3	значение постоянной времени		
$ТВ_4$	x_1	представление ПФ ДЗ в частотной форме - АФЧХ		По передаточной функции ДЗ $W(p)=\frac{1}{4p}$ определить частотные характеристики: АФЧХ, АЧХ и ФЧХ.
	x_2	получение АЧХ по ПФ		
	x_3	получение ФЧХ по ПФ		
$ТВ_5$	x_1	получение ВЧХ по ПФ		По передаточной функции ДЗ $W(p)=50p$, найти частотные характеристики: ВЧХ и МЧХ и представить ПФ в показательной форме.
	x_2	получение МЧХ по ПФ		
	x_3	Представление ПФ ДЗ в показательной форме		
$ТВ_6$	x_1	получение коэффициента усиления по ПФ		По ПФ $W(p)=\frac{120p\ \ +12}{p^3+10p^2+100p}$ определить коэффициент усиления k, оценить условие физической реализуемости и наличие или отсутствие астатизма.
	x_2	знание условия реализуемости ПФ		
	x_3	оценка астатизма по ПФ		
$ТВ_7$	x_1	нахождение системной матрицы A	$\begin{cases}\dot{x}_1=x_1+x_2,\\ \dot{x}_2=-5x_1+x_3,\\ \dot{x}_3\,x=-3x_1-2x_2-x_3+4u,\\ y=x_1.\end{cases}$	По ДУ в переменных состояния, получить ММ объекта в матрично-векторной форме
	x_2	нахождение матрицы управления B		
	x_3	нахождение матрицы выходов C		
$ТВ_8$	x_1	нахождение ПФ в общем виде	Im Re $p_1=-0{,}5$ $p_2=-0{,}1$	По расположению корней ХП ПФ на комплексной плоскости определить ПФ в общем виде, тип корней и значение постоянных времени.
	x_2	определение типа корней		
	x_3	нахождение постоянных времени		

№ ТВ ($ТВ_i$)	№ ФЗ в $ТВ_i$	Формулировка фактора знания		Формулировка тестового вопроса
$ТВ_9$	x_1	определение по ЛАЧХ ПФ в общем виде	L(w); -40 дБ\дек; 0; w_1; w_2; lgw	По виду ЛАЧХ ДЗ определить ПФ в общем виде, наличие астатизма и сопрягающую частоту.
	x_2	определение по ЛАЧХ наличие астатизма		
	x_3	нахождение сопрягающей частоты		

Таблица 2

Правильные и неправильные ответы по факторам ТВ таблицы 1

Характеристика ответов	Тестовые вопросы	Ответы по факторам знания		
		x_1	x_2	x_3
Правильные	$ТВ_1$	$W(p)=\frac{2p+12}{p^2+6p+5}$	Нуль: $p=-6$	Полюсы: $p=-1; p=-5$
	$ТВ_2$	Интегрирующее звено	$\frac{1}{0{,}1\cdot p}$	- 20 дб\дек
	$ТВ_3$	$W(p)=k\cdot(Tp+1)$	$k=10$	$T=0{,}1$
	$ТВ_4$	$W(jw)=-0{,}25jw^{-1}$	$A(w)=0{,}25w^{-1}$	$\varphi(w)=-\frac{\pi}{2}$
Правильные	$ТВ_5$	$\mathrm{Re}(w)=0$	$\mathrm{Im}(w)=50jw$	$W(jw)=50w\cdot e^{j\frac{\pi}{2}}$
	$ТВ_6$	$k=0{,}12$	ПФ — физически реализуемая	астатическая
	$ТВ_7$	$A=\begin{vmatrix}1 & 1 & 0\\ -5 & 0 & 3\\ -3 & -2 & -1\end{vmatrix}$	$B=\begin{vmatrix}0\\0\\4\end{vmatrix}$	$C=\begin{vmatrix}1 & 0 & 0\end{vmatrix}$
	$ТВ_8$	$W(p)=\frac{k}{(T_1p+1)\cdot(T_2p+1)}$	вещественные полюса	$T_1=2$, $T_2=10$
	$ТВ_9$	$W(p)=\frac{k}{(T^2p^2+2\xi Tp+1)}$	объект статический	w_1 — сопрягающая частота
Неправильные	$ТВ_1$	$W(p)=\frac{p^2+6p+5}{2p+12}$	Нули: $p=-1; p=-5$	Полюс: $p=-6$
	$ТВ_2$	Дифференцирующее звено	$20\cdot p$	+20 дб\дек

Характеристика ответов	Тестовые вопросы	Ответы по факторам знания		
		x_1	x_2	x_3
	ТВ$_3$	$W(p)=\frac{k}{(Tp+1)}$	$k=20$	$T=10$
	ТВ$_4$	$W(jw)=-0{,}25jw$	$A(w)=-0{,}25jw$	$\varphi(w)=+\frac{\pi}{2}$
	ТВ$_5$	$Re(w)=50$	$Im(w)=jw$	$W(jw)=-50w\cdot e^{\frac{\pi}{2}}$
	ТВ$_6$	$k=0{,}1$	ПФ — физически не реализуемая	статическая
	ТВ$_7$	$A=\begin{vmatrix}1 & 1 & 0\\ -5 & 3 & 0\\ -3 & -2 & -1\end{vmatrix}$	$B=\begin{vmatrix}4\\ 0\\ 0\end{vmatrix}$	$C=\begin{vmatrix}1 & 0 & 0\end{vmatrix}$
	ТВ$_8$	$W(p)=k\cdot(T_1p+1)\cdot(T_2p+1)$	мнимые нули	$T_1=0{,}5$ $T_1=0{,}1$
	ТВ$_9$	$W(p)=k\cdot(T^2p^2+2\xi Tp+1)$	объект астатический	w_2 — сопрягающая частота

По вопросам таблицы 1 была проведена аттестация группы студентов. На каждый вопрос предлагалось по четыре варианта ответа, составленных из правильных и неправильных ответов по ФЗ вопроса из таблицы 2. При этом выполнялось условие (5). Общее количество тестируемых составило 10 человек. Оценки ответов и результаты их обработки сведены в таблицу 3.

В таблице 3 цветом выделены вопросы, в которых тестируемые выбрали две строки ответов.

Расчет тестовых оценок начинается с получения оценки ответа j-го тестируемого на i-й тестовый вопрос $\bar{e}_{ij}$. Это оценка рассчитывается как среднее значение оценок строк тестового вопроса, которых выбрал тестируемый:

$$\bar{e}_{ij}=\frac{1}{k}\cdot\sum_{l=1}^{k}e_{lij}, \tag{6}$$

где k — количество выбранных строк ответов в j-м тестовом задании $(k\le 2)$.

Допущенная вариативность ответа позволяет ввести меру неравномерности знаний испытуемым всех ФЗ i-го ТВ σ_{ij}. Она рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{ij}=\sqrt{\frac{1}{k-1}\cdot\sum_{l=1}^{k}\left(e_{lij}-\bar{e}_{ij}\right)^2}. \tag{7}$$

Усредненное знание j-м испытуемым всех ФЗ из n вопросов теста естественно оценить показателем $\overline{e_j}$, рассчитываемым по формуле:

$$\overline{e_j}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\bar{e}_{ij}. \tag{8}$$

Таблица 3

Ответы по факторам ТВ таблицы 1 и данные их обработки

№ теста (i)	Номер тестируемого (j)									
	1		2		3		4		5	
	$(e_1)_i$ / $(e_2)_i$	$(\bar{e}_1)_i$ / $\sigma_{(e)_i1}$	$(e_1)_i$ / $(e_2)_i$	$(\bar{e}_2)_i$ / $\sigma_{(e)_i2}$	$(e_1)_i$ / $(e_2)_i$	$(\bar{e}_3)_i$ / $\sigma_{(e)_i3}$	$(e_1)_i$ / $(e_2)_i$	$(\bar{e}_4)_i$ / $\sigma_{(e)_i4}$	$(e_1)_i$ / $(e_2)_i$	$(\bar{e}_5)_i$ / $\sigma_{(e)_i5}$
1	0,67	0,67	0,67	0,67	1	1	0	0,165	0,67	0,67
	0,67	0	0,67	0	1	0	0,33	0,054	0,67	0
2	0,67	0,67	1	1	1	1	1	0,835	0,67	0,67
	0,67	0	1	0	1	0	0,67	0,054	0,67	0
3	0	0	1	1	1	1	0,33	0,5	1	1
	0	0	1	0	1	0	0,67	0,057	1	0
4	0,67	0,67	0	0	0	0	1	1	1	1
	0,67	0	0	0	0	0	1	0	1	0
5	1	0,665	0,33	0,33	1	1	1	1	0,33	0,33
	0,33	0,224	0,33	0	1	0	1	0	0,33	0
6	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0,835
	0	0	0	0	1	0	1	0	0,67	0,054
7	1	0,835	0,33	0,33	0,67	0,67	1	1	1	0,835
	0,67	0,054	0,33	0	0,67	0	1	0	0,67	0,054
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
9	0,33	0,33	1	1	1	1	1	1	0,67	0,67
	0,33	0	1	0	1	0	1	0	0,67	0
$\overline{e_{js}}$		0,537		0,592		0,852		0,833		0,779
σ_{js}		0,176		0		0		0,136		0,11
№ теста (i)	6		7		8		9		10	
	$(e_1)_i$ / $(e_2)_i$	$(\bar{e}_6)_i$ / $\sigma_{(e)_i6}$	$(e_1)_i$ / $(e_2)_i$	$(\bar{e}_7)_i$ / $\sigma_{(e)_i7}$	$(e_1)_i$ / $(e_2)_i$	$(\bar{e}_8)_i$ / $\sigma_{(e)_i8}$	$(e_1)_i$ / $(e_2)_i$	$(\bar{e}_9)_i$ / $\sigma_{(e)_i9}$	$(e_1)_i$ / $(e_2)_i$	$(\overline{e_{10}})_i$ / $\sigma_{(e)_i10}$
1	6		0	0,165	0,67	0,67	1	1	0,67	0,67
	0,33	0,33	0,33	0,054	0,67	0	1	0	0,67	0
2	0,33	0	1	0,665	1	1	1	1	1	1
	1	1	0,33	0,224	1	0	1	0	1	0
3	1	0	1	0,665	0,67	0,67	1	1	1	1
	0,33	0,33	0,33	0,224	0,67	0	1	0	1	0
4	0,33	0	0	0,165	1	1	0	0	0,67	0,67
	0,67	0,67	0,33	0,054	1	0	0	0	0,67	0
5	0,67	0	0,33	0,33	1	1	1	1	0,67	0,67
	0,33	0,33	0,33	0	1	0	1	0	0,67	0
6	0,67	0,67	0	0	1	1	1	1	0,67	0,67
	0,67	0	0	0	1	0	1	0	0,67	0
7	0,67	0,67	0,67	0,67	1	1	1	1	0,67	0,67
	0,67	0	0,67	0	1	0	1	0	0,67	0
8	0,67	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	0,33	0,33	1	0	1	0	1	0	1	0
9	0,33	0	1	1	1	1	1	1	0,33	0,33
	0,33	0,33	1	0	1	0	1	0	0,33	0
$\overline{e_{js}}$		0,518		0,517		0,926		0,889		0,742
σ_{js}		0		0,249		0		0		0

Тогда неравномерности знания испытуемым всего материала, охватываемого тестом, оцениваются усредненным значением σ_j всех СКО j -го тестируемого, рассчитанных для него по всему тесту (всем ТВ):

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{l=1}^{n} \sigma_{ij}{}^2}. \qquad (9)$$

Таким образом, полученные после статистической обработки факторного теста данные достаточно разносторонни и представительны, т. к. поддержаны всеми ФЗ, входящими во все ТВ теста (в рассматриваемом случае – 3х9=27). Наряду с традиционной для процедуры тестирования общей оценкой доли усвоенного материала — $\overline{e_i}$, а также дифференцированной оценкой хорошо и плохо усвоенных его элементов — $\overline{e_{ij}}$, факторная структура теста позволяет оценить дополнительные характеристики знания. К таким характеристикам относится возможность более дифференцированной общей оценки каждого ТВ, а также неравномерности знания ФЗ в нем — σ_{ij} . Также, более дифференцированно оценивается общее знание раздела, т.к. $\overline{e_i}$ характеризуется большей дискретизацией. Кроме того, возникает возможность общей оценки неравномерности этого знания σ_j .

На рис. 1 приведены гистограмма оценки результатов тестирования группы из десяти фигурантов, проходивших тестирование по материалу из таблиц 1, 2, ответы которых приведены в таблице 3. Там же приведены результаты обработки полученных оценок по формулам (6)–(9).

Столбчатые гистограммы построены по полученным усредненным оценкам тестируемых по всему тесту от наилучших результатов к наихудшему.

Столбцы гистограммы № 8, № 9, № 3, № 10, № 2, № 6 построены по оценкам испытуемых, выбравших в качестве ответов по одной строке в каждом тестовом задании. Столбцы гистограммы № 4, № 5, № 1, № 7 характеризуют испытуемых, проявивших неуверенность своих знаний при ответе на определенные тестовые задания и указавших две строки ответов. У этих испытуемых верхушку столбца средней оценки, полученной за тест, «размывает» значение СКО, указывающее на неуверенность знаний тестируемых студентов. Это уменьшает фактическую оценку.

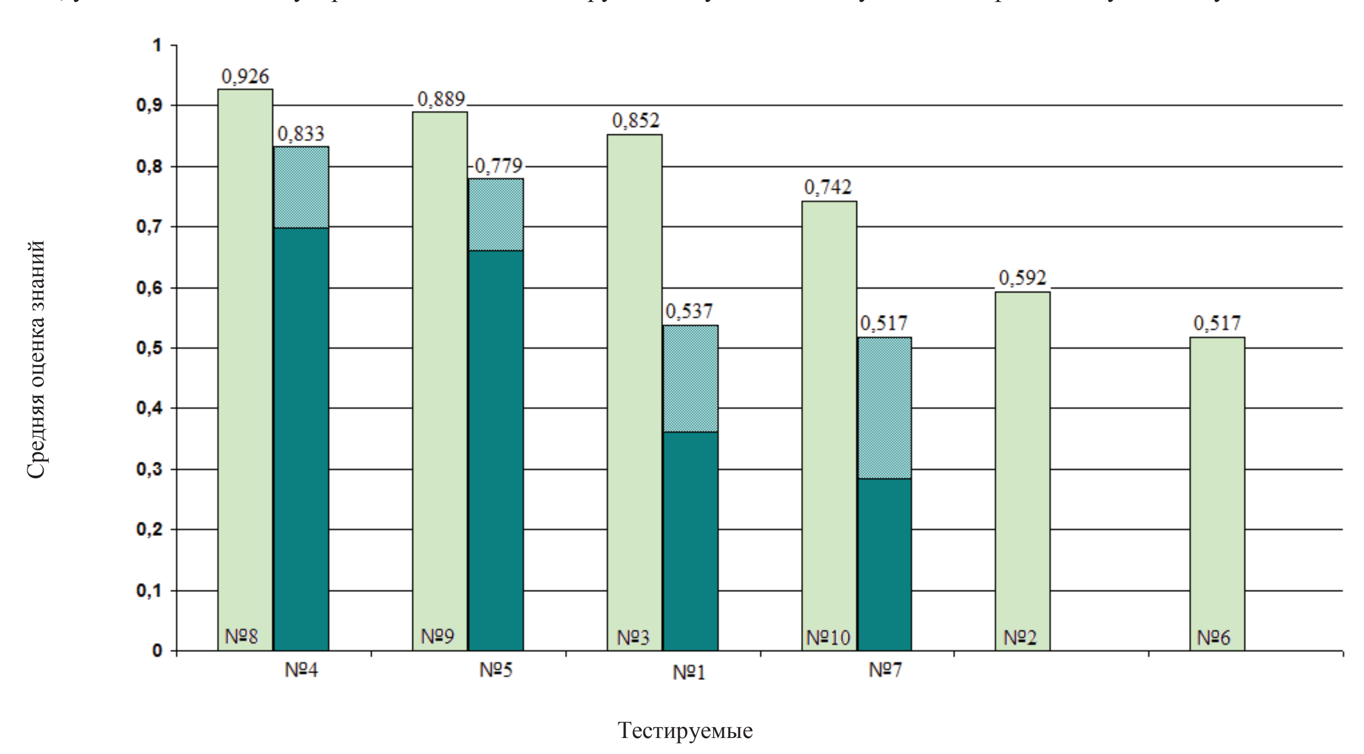


Рис. 1. Гистограмма оценки результатов тестирования

Выводы. Рассмотренные примеры тестовых вопросов демонстрируют хороший уровень формализации и удобство составления тестов на основе методики многофакторного планирования двухуровневых экспериментов. Кроме того, хорошо формализуется оценка результатов теста, что повышает его объективность. Важным нововведением является допущение своеобразной «нечеткости» ответа на вопрос теста, и порождаемая этим двухпараметрическая оценка результата теста: оценка неполного знания и степени уверенности этого знания. Результаты тестирований с использованием двухфакторных и трехфакторных тестовых заданий установили роль «факторности» теста, влияющую на ранжирование испытуемых с неуверенными знаниями. Таким образом, предложенная модель оценки результатов факторного тестирования вполне логична, проста и достаточно адекватно отражает состояние знания тестируемого. Она дает дополнительные возможности, как преподавателю для оценки не только среднего знания, но и степени уверенности испытуемого, так и самому тестируемому, давая ему шанс в виде ответов с частичными знаниями. Эти свойства факторного подхода к тестированию подтверждены многократным тестированием студентов кафедры «Автоматизация производственных процессов», изучающих дисциплину «Теория автоматического управления».

Библиографический список

1. Ефремова, Н. Ф. Проблемы формирования фондов оценочных средств ВУЗов / Н. Ф. Ефремова // Высшее образование сегодня. — 2011. — № 3. — С. 17–21.
2. Ефремова, Н. Ф. Системность и преемственность в формировании фонда оценочных средств технического ВУЗа / Н. Ф. Ефремова, Б. Ч. Месхи // Совет ректоров. — 2011. — № 5. — С. 33–40.
3. Вешнева И. В. Разработка базы моделей интеллектуальной системы мониторинга процесса формирования профессиональных и общекультурных компетенций студентов вузов. Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2012. — Т.1, № 2(64). — С. 348–355.
4. Васин, А. Н. Информационная образовательная среда — путь к повышению эффективности образовательного процесса / А. Н. Васин // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2010. — № 1(44). — С. 121–126.
5. Ефремова, Н. Ф. Подходы к оцениванию компетенций студентов первого курса, приступающих к освоению основных образовательных программ / Н. Ф. Ефремова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — № 5. — С. 774–782.
6. Ефремова, Н. Ф. Особенности построения региональной системы оценки качества образования / Н. Ф. Ефремова // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2009. — № 1. — С. 762–772.
7. Большаков, А. А. Контроль знаний в интеллектуальной обучающей системе по курсу «Надежность систем автоматизации» / А. А. Большаков, А. Ю. Маркелов // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2010. — № 4(50). — С. 153–156.
8. Большаков, А. А. Оценка результативности функционирования автоматизированной обучающей экспертной системы / А. А. Большаков, В. В. Шатохин // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2010. — № 4(50). — С. 149–153.
9. Большакова, М. А. Создание автоматизированной обучающей системы для изучения иностранного языка в неязыковых вузах / М. А. Большакова // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2010. — № 4(50). — С. 161–164.
10. Большаков, А. А. Управление образовательным процессом на основе автоматизированных комбинированных обучающих систем / А. А. Большаков, О. Н. Долинина, В. В. Шатохин // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2008. — № 3(35). — С. 54–62.
11. Черткова, Е. А. Автоматизация анализа и проектирования компьютерных обучающих систем / Е. А. Черткова // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2006. — № 1(11). — С. 97–103.
12. Кузнецов, А. В. Оценивание параметров тестов / А. В. Кузнецов // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2006. — № 2(13). — С. 9–13.
13. Нейдорф, Р. А. Методология организации тестирования на основе алгоритмов планирования и обработки двухуровневых многофакторных экспериментов / Р. А. Нейдорф, Е. Н. Обухова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 2 (77). — С. 110–120.
14. Нейдорф, Р. А. Методология построения тестов на основе алгоритма планирования двухуровневых многофакторных экспериментов / Р. А. Нейдорф, Е. Н. Обухова // Информационные технологии в управлении (ИТУ-2012) : материалы 5-й Рос. мультиконф. по проблемам управления. — Санкт-Петербург, 2012. — С. 861–870.
15. Нейдорф, Р. А. Алгоритм расчета и оценки результатов факторно-тестовой оценки / Р. А. Нейдорф, Е. Н. Обухова // Научное обозрение. — 2015. — № 2. — С. 41–56.
16. Нейдорф, Р. А. Методика составления тестовых заданий на основе алгоритма планирования двухуровневых многофакторных экспериментов и анализ их использования в образовательном процессе /

Р. А. Нейдорф, Е. Н. Обухова // Методики и технологии обеспечения и оценки качества образования сб. материалов междунар. науч. конф. — Киев, 2013. — С. 23–28.

17. Обухова, Е. Н. Особенности формирования оценок в строках ответов в двухфакторном тестовом задании / Е. Н. Обухова // Аспирант. — 2014. — № 4. — С. 65–67.

18. Нейдорф, Р. А. Анализ применения трехфакторных дробных тестов в учебном процессе / Р. А. Нейдорф, Е. Н. Обухова // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. XXVI междунар. науч. конф. — Н. Новгород, 2013. — С. 320–323.

19. Обухова, Е. Н. Построение и исследование тестовых заданий при разбиении их на дробные реплики // Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии : тр. X междунар. науч.-техн. форума. — Ростов-на-Дону, 2012. — С. 363–367.

20. Афанасьев, В. В. Теория вероятностей в вопросах и задачах / В. В. Афанасьев. — Ярославль : изд-во Яросл. гос. пед. ун-т им. К. Д. Ушинского, 2004. — 249 с.

References

1. Yefremova, N.F. Problemy formirovaniya fondov otsenochnykh sredstv VUZov. [Generation problems of university assessment resources funds.] Higher Education Today, 2011, no. 3, pp. 17–21 (in Russian).

2. Yefremova, N.F., Meskhi, B.C. Sistemnost' i preemstvennost' v formirovanii fonda otsenochnykh sredstv tekhnicheskogo VUZa. [Systemacity and consistency in the assessment tools fund formation at the technical university.] Sovet rektorov, 2011, no. 5, pp. 33–40 (in Russian).

3. Veshneva, I.V. Razrabotka bazy modeley intellektual'noy sistemy monitoringa protsessa formirovaniya professional'nykh i obshchekul'turnykh kompetentsiy studentov vuzov. [The development of the model of intellectual system of the formation of professional and transcultural competences of universities students monitoring process.] Vestnik Saratov State Technical University, 2012, vol.1, no. 2(64), pp. 348–355(in Russian).

4. Vasin, A.N. Informatsionnaya obrazovatel'naya sreda — put' k povysheniyu effektivnosti obrazovatel'nogo protsessa. [Information educational environment – the way to educational process efficiency increase.] Vestnik Saratov State Technical University, 2010, no. 1(44), pp. 121–126 (in Russian).

5. Yefremova, N.F. Podkhody k otsenivaniyu kompetentsiy studentov pervogo kursa, pristupayushchikh k osvoeniyu osnovnykh obrazovatel'nykh program. [Approaches to the competencies assessment of the first-year students starting main educational programs.] Vestnik of DSTU, 2010, no. 5, pp. 774–782 (in Russian).

6. Yefremova, N.F. Osobennosti postroeniya regional'noy sistemy otsenki kachestva obrazovaniya. [Peculiarities of formation of a regional system of educational quality control.] Vestnik of DSTU, 2009, no. 1, pp. 762–772 (in Russian).

7. Bolshakov, A.A., Markelov, A.Yu. Kontrol' znaniy v intellektual'noy obuchayushchey sisteme po kursu «Nadezhnost' sistem avtomatizatsii». [Control of knowledge in intellectual training system at the rate “reliability of systems of automation”.] Vestnik Saratov State Technical University, 2010, no. 4(50), pp. 153–156 (in Russian).

8. Bolshakov, A.A., Shatohin, V.V. Otsenka rezul'tativnosti funktsionirovaniya avtomatizirovannoy obuchayushchey ekspertnoy sistemy. [Estimation of productivity of functioning of the automated training expert system.] Vestnik Saratov State Technical University, 2010 no. 4(50), pp. 149–153 (in Russian).

9. Bolshakova, M.A. Sozdanie avtomatizirovannoy obuchayushchey sistemy dlya izucheniya inostrannogo yazyka v neyazykovykh vuzakh. [Creation of the automated learning system for learning of foreign language in not language high schools.] Vestnik Saratov State Technical University, 2010, no. 4(50), pp. 161–164 (in Russian).

10. Bolshakov, A.A., Dolinina, O.N., Shatokhin, V.V. Upravlenie obrazovatel'nym protsessom na osnove avtomatizirovannykh kombinirovannykh obuchayushchikh sistem. [Computerized teaching systems in management of education.] Vestnik Saratov State Technical University, 2008, no. 3(35), pp. 54–62 (in Russian).

11. Chertkova, E.A. Avtomatizatsiya analiza i proektirovaniya komp'yuternykh obuchayushchikh system. [Analysis automation and computer teaching systems design.] Vestnik Saratov State Technical University, 2006 no. 1(11), pp. 97–103 (in Russian).

12. Kuznetsov, A.V. Оценивание параметров тестов [Test parameters estimation.] Vestnik Saratov State Technical University, 2006, no. 2(13), pp. 9–13 (in Russian).

13. Neydorf, R.A., Obukhova, E.N. Metodologiya organizatsii testirovaniya na osnove algoritmov planirovaniya i obrabotki dvukhurovnevykh mnogofaktornykh eksperimentov. [Testing design methodology based on two-level multifactor experiment planning and data processing.] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 2 (77), pp. 110–120 (in Russian).

14. Neydorf, R.A., Obukhova, E.N. Metodologiya postroeniya testov na osnove algoritma planirovaniya dvukhurovnevykh mnogofaktornykh eksperimentov. [Methodology of tests construction based on scheduling algorithm for two-level multifactorial experiments.] Informatsionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2012): materialy 5-y Ros. mul'tikonf. po

problemam upravleniya. [Information technologies in management (ITU-2012): Proc. 5th RF Multi-conf. on management problems.] St. Petersburg, 2012, pp. 861–870 (in Russian).

15. Neydorf, R.A., Obukhova, E.N. Algoritm rascheta i otsenki rezul'tatov faktorno-testovoy otsenki. [Algorithm for calculating and evaluating the factor-test assessment.] Nauchnoe obozrenie, 2015, no. 2, pp. 41–56 (in Russian).

16. Neydorf, R.A., Obukhova, E.N. Metodika sostavleniya testovykh zadaniy na osnove algoritma planirovaniya dvukhurovnevykh mnogofaktornykh eksperimentov i analiz ikh ispol'zovaniya v obrazovatel'nom protsesse. [Test task design methodology based on two-level multifactor experiment planning algorithm and analysis of its application in the educational process.] Metodiki i tekhnologii obespecheniya i otsenki kachestva obrazovaniya sb. materialov mezhdunar. nauch. konf. [Techniques and technologies to ensure and assess the quality of education: Proc. Int. Sci. Conf.] Kiev, 2013, pp. 23–28 (in Russian).

17. Obukhova, E.N. Osobennosti formirovaniya otsenok v strokakh otvetov v dvukhfaktornom testovom zadanii. [Specific features of assessment generation in the response lines in two-factor test task.] Aspirant, 2014, no. 4, pp. 65–67 (in Russian).

18. Neydorf, R.A., Obukhova, E.N. Analiz primeneniya trekhfaktornykh drobnykh testov v uchebnom protsesse. [Analysis of the application of fractional three-factor test in the educational process.] Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh: sb. tr. XXVI mezhdunar. nauch. konf. [Mathematical methods in engineering and technologies: Proc. XXVI Int. Sci. Conf.] N. Novgorod, 2013, pp. 320–323 (in Russian).

19. Obukhova, E.N. Postroenie i issledovanie testovykh zadaniy pri razbienii ikh na drobnye repliki. [Construction and investigation of test tasks when partitioning them into fractional replicates.] Innovatsiya, ekologiya i resursosberegayushchie tekhnologii : tr. X mezhdunar. nauch.-tekhn. foruma. [Innovation, ecology and resource-saving technologies: Proc. X Int. Sci.-Eng. Forum.] Rostov-on-Don, 2012, pp. 363–367 (in Russian).

20. Afanasyev, V.V. Teoriya veroyatnostey v voprosakh i zadachakh. [Probability theory in questions and problems.] Yaroslavl' : izd-vo Yarosl. gos. ped. un-ta im. K. D. Ushinskogo, 2004, 249 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 19.05.2015
Сдана в редакцию 19.05.2015
Запланирована в номер 30.06.2015

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 621.893 DOI 10.12737/12599

Исследование возможности применения генетических алгоритмов для реализации криптоанализа блочных криптосистем*

Ю. О. Чернышев[1], А. С. Сергеев[2], Н. Н. Венцов [3], А. Н. Рязанов[4]**
[1,2,3,4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Feasibility study of genetic algorithms application for implementation of block cryptosystem cryptanalysis ***

Y. O. Chernyshev [1], A. S. Sergeyev [2], N. N. Ventsov [3], A. N. Ryazanov [4]**
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Рассматривается возможность применения алгоритмов генетического поиска для реализации криптоанализа блочных методов шифрования. Отличительной особенностью применения биоинспирированных методов криптоанализа (в частности, генетических методов) является возможность использования самого алгоритма шифрования (или расшифрования) в качестве целевой функции для оценки пригодности ключа, определенного с помощью генетических операций. Вследствие этого при использовании биоинспирированных методов криптоанализа процесс определения секретного ключа (например, при криптоанализе второго типа) зависит не столько от сложности шифрующих преобразований, сколько от самого биоинспирированного метода, который должен обеспечивать достаточное разнообразие генерации ключей, что свидетельствует об актуальности задачи исследования возможности применения биоинспирированных алгоритмов (в частности, методов генетического поиска) для криптоанализа блочных криптосистем. Отмечается также, что поскольку отличительной особенностью как блочных методов шифрования, так и генетических алгоритмов, является их внутренний параллелизм, то задача разработки алгоритма криптоанализа на основе параллельной реализации составляющих этапов является актуальной. Предлагается алгоритм криптоанализа блочных методов на примере стандарта DES на основе его параллельной версии, приводятся результаты эксперимента при определении квазиоптимального ключа, полученные при параллельной реализации алгоритма на 8-буквенных блоках текста. Отмечается, что временные затраты алгоритма не превосходят временных затрат при реализации известных методов криптоанализа.

Ключевые слова: криптоанализ, генетический алгоритм, блочный алгоритм шифрования, популяция ключей, кроссинговер**,** квазиоптимальный ключ.

Feasibility of genetic search algorithms application for implementation of the cryptanalysis of block cipher methods is considered. A distinctive feature of the bioinspired cryptanalysis methods application (in particular, genetic methods) is the possibility of using the encryption (or decryption) algorithm as an objective function for the suitability evaluation of the key defined by genetic operations. Consequently, when using the bioinspired cryptanalysis methods, the S key definition (for example, when using type 2 cryptanalysis) depends not so much on the complexity of the ciphering transformations, as on the bioinspired method which is to provide a sufficient variety of key generation that shows the significance of the research task of the bioinspired algorithms feasibility (in particular, genetic search methods) for the block cryptosystem cryptanalysis. It is noted also that as the distinctive feature of both block cipher methods, and the genetic algorithms is their internal parallelism, then the task of developing a cryptanalysis algorithm based on the parallel implementation of the constituent stages is relevant. An algorithm of the block methods cryptanalysis on the example of the DES standard on the basis of its parallel version is offered; the experiment results of the quasioptimal key determination obtained at the parallel algorithm implementation on the 8-letter text blocks are given. It is noted that time costs of the algorithm realization do not exceed the time of the known cryptanalysis implementation.

Keywords: cryptanalysis, genetic algorithm, block cipher algorithm, population of keys, crossover, quasioptimal key.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-01-00343, 14-01-00634, 15-05-00129).
** E-mail: myvnn@list.ru, sergeev00765@mail.ru, vencov@list.ru, alexandr_r89@mail.ru
*** The research is done with the financial support from RFBR (projects 13-01-00343, 14-01-00634, 15-05-00129).

Введение. В настоящее время при разработке компьютерных технологий, обеспечивающих информационную безопасность и защиту информации, широкое применение находят криптографические методы защиты. Для решения задач криптоанализа, относящихся к классу *NP*-полных, в последние годы применяются алгоритмы, основанные на природных системах. К ним относятся методы моделирования отжига, генетические алгоритмы (ГА), эволюционные методы, алгоритмы роевого интеллекта и т.д. В моделях и алгоритмах эволюционных вычислений ключевым элементом является построение начальной модели и правил, по которым она может изменяться (эволюционировать). В течение последних лет были предложены разнообразные схемы эволюционных вычислений, в т.ч. генетический алгоритм, генетическое программирование, эволюционные стратегии, эволюционное программирование.

В работе [1] рассматривались задачи криптоанализа и приведены результаты криптоанализа классических симметричных криптографических алгоритмов с использованием методов эволюционной оптимизации и генетического поиска для симметричных шифров перестановок, а также для реализации шифров простой и многоалфавитной замены. Среди обзорных работ, посвященных описанию методов и перспектив развития криптоанализа, следует отметить [2–4], в которых описаны универсальные методы (метод полного перебора, атака по ключам, частотный анализ, метод Полларда), методы криптоанализа симметричных (статистический метод, метод дифференциального анализа, метод линейного анализа) и асимметричных (задача дискретного логарифмирования, задача факторизации) криптосистем, а также новый вид криптоанализа — атаки по побочным каналам. В работе [2] также приводится краткое изложение новых технологий, связанных с использованием ГА, нейронных сетей и квантовых компьютеров.

Криптоанализ асимметричных алгоритмов шифрования описан в [4–6], где представлен ГА для решения задачи определения вариантов разложения заданного числа *N* на множители и ГА разложения заданного числа на два взаимно простых сомножителя, а также алгоритм нахождения простого делителя числа. В работе [7] представлены алгоритмы муравьиных и пчелиных колоний для разложения составных чисел на множители путем определения делителя числа с заданной точностью в заданном интервале. Описание алгоритма «пчелиных колоний» для реализации криптоанализа шифров перестановки, и сведение его к классической задаче о назначениях приведено в [8].

Метод криптоанализа блочного алгоритма. Таким образом, возникает вопрос о возможности применения биоинспирированных методов для криптоанализа современных блочных алгоритмов шифрования, т.к. переход к блочному шифрованию открывает дополнительные возможности для повышения стойкости криптоалгоритмов. Одним из приемов при шифровании является многократная, состоящая из нескольких циклов, обработка одного блока открытого текста. Основные принципы построения блочных шифров, структура алгоритмов блочного шифрования (схема Фейстеля) описаны, например, в [3].

Отличительной особенностью применения биоинспирированных методов криптоанализа (в частности, ГА) является возможность использования самого алгоритма шифрования (или расшифрования) в качестве целевой функции для оценки пригодности ключа, определенного с помощью генетических операций. Поэтому можно утверждать, что при использовании ГА процесс определения секретного ключа (например, при криптоанализе второго типа) зависит не столько от сложности шифрующих преобразований, сколько от самого биоинспирированного метода, который должен обеспечивать достаточное разнообразие генерации ключей. В этой связи задача исследования возможности применения биоинспирированных алгоритмов для криптоанализа блочных криптосистем является, несомненно, актуальной.

Рассмотрим организацию криптоанализа блочных методов с использованием ГА на примере представителя блочных шифров — стандарта DES.

Заметим, что важным свойством как блочных методов, так и ГА, является их внутренний параллелизм, основные модели параллельных ГА (глобальный параллельный ГА, островная модель, клеточный ГА) приведены в [1]. В этой связи для разработки криптоанализа данного алгоритма с помощью эволюционного подхода рассмотрим вначале процесс параллельной реализации составляющих его этапов. Исходя из непосредственного описания алгоритма, можно выделить следующие основные параллельно выполняемые этапы:

- параллельная обработка 64-битовых блоков шифртекста;
- параллельная обработка восьми 6-битовых блоков $B_1 \ldots B_8$;
- параллельная обработка блоков C_i и D_i и формирование ключей K_i.

С использованием этих очевидных преобразований схема одного цикла алгоритма представлена на рис. 1 [9].

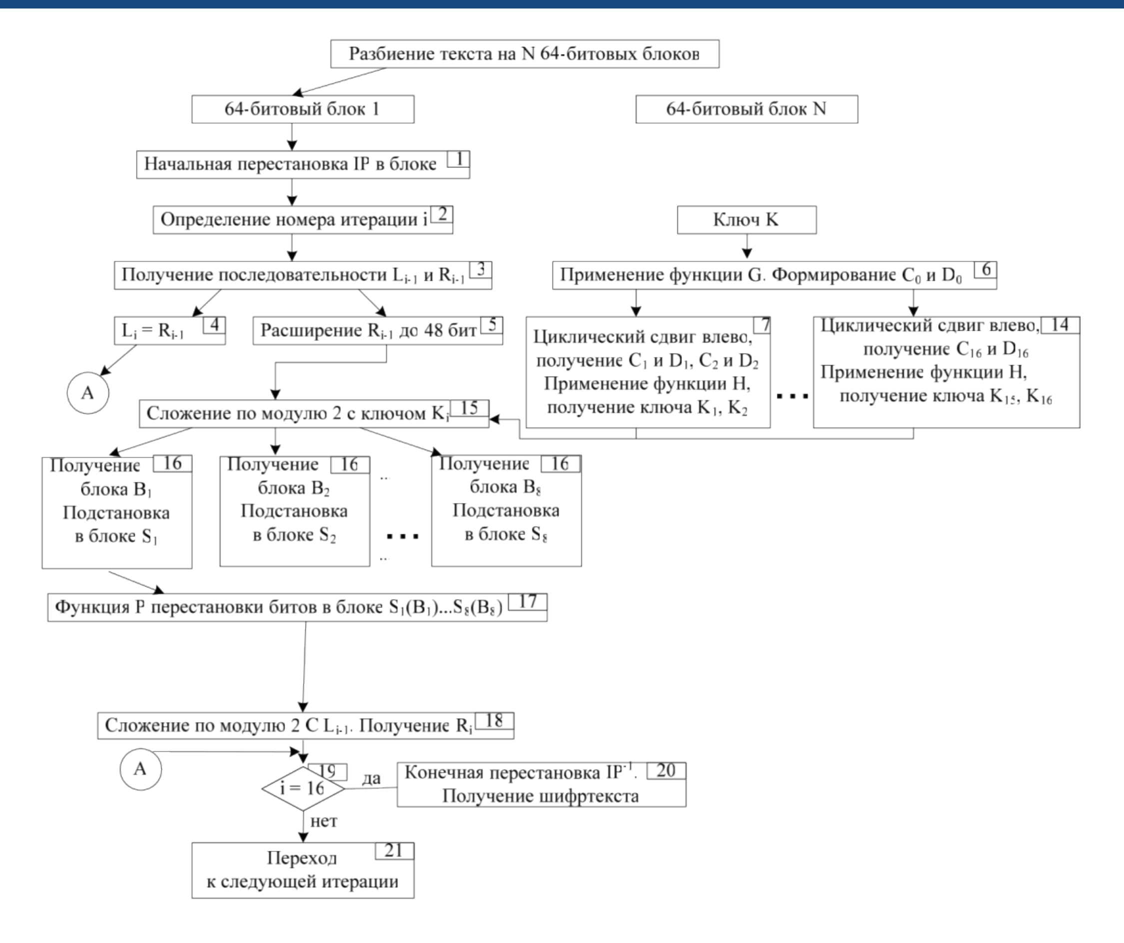


Рис. 1. Структурная схема цикла алгоритма DES

Для дальнейшего определения множества независимых операторов, допускающих параллельное выполнение, используются методы, описанные в [10, 11].

Построим информационно-логическую граф-схему $G = (X, U)$ алгоритма DES, где множество X вершин соответствует множеству операторов алгоритма, множество U дуг состоит из дуг, определяющих связи по управлению (двойная линия) и по информации (одинарная линия). Граф-схема алгоритма позволяет представить и проанализировать как общую структуру алгоритма, так и связи между отдельными операторами, и показана на рис. 2.

Для данного графа введем в рассмотрение матрицу следования S. Элемент $S(ij) = *$, если существует связь по управлению ($j \Rightarrow i$) и $S(ij) = 1$, если существует связь по информации ($j \rightarrow i$).

Используя алгоритм нахождения транзитивных связей, получим матрицу S_T [10, 11]. Далее введем в рассмотрение матрицу L логической несовместимости операторов, используя алгоритм, также приведенный в [10, 11]. Для объединения информации о логической несовместимости операторов и их информационно-логической связи откажемся от ориентированности графа G и построим матрицу S_T', полагая $(i, j) = (j, i) = 1$.

На матрицу S_T' наложим матрицу L, определив значение каждого элемента по правилам дизъюнкции. Получим матрицу независимости M, по нулевым элементам которой в строке (пробелам) можно указать множество тех операторов, каждый из которых может быть выполнен параллельно с оператором, соответствующим номеру строки. Структуры матриц S, S_T, L, S_T', M приведены в [9].

Таким образом, на основе построенной параллельной схемы алгоритма представим метод криптоаналитической атаки второго типа, т.е. при наличии известного текста и шифртекста требуется определить ключ K, используемый для шифрования, с целью дешифрования других сообщений, зашифрованных тем же ключом.

Поскольку секретность DES полностью определяется ключом, задачей эволюционного поиска является генерация популяции ключей и оценка их оптимальности с последующим применением стандартного набора генетических операций. То есть применение генетического поиска непосредственным образом для проведения криптоаналитической атаки второго типа при заданных 64-битовых блоках исходного текста и шифртекста можно представить структурной схемой, ГА показанной на рис. 3 (на схеме K_{ij}: i — номер индивидуума в популяции, j — номер варианта, используемого на j-й итерации).

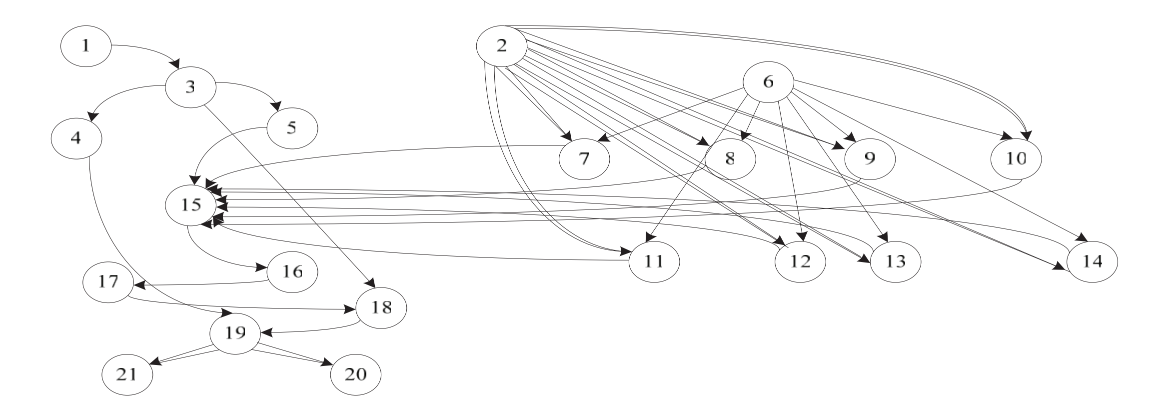


Рис. 2. Информационно-логическая граф-схема алгоритма *DES*

Как видно из схемы (рис. 3), после формирования начальной популяции ключей производится оценка их пригодности (определение целевой функции), т.е. проверка, насколько полученный с их помощью шифртекст совпадает с известным. После оценки производится селекция индивидуумов популяции для проведения множества генетических операций и получения множества потомков, далее полученная расширенная популяция подвергается дальнейшему оцениванию. Процесс заканчивается, когда прекращается эволюционирование популяции, либо когда исчерпан заданный временной ресурс (пройдено заданное количество генераций).

Следовательно, если сформирована популяция из P индивидуумов, то время работы алгоритма T составит $T = Pt$, где t — время оценки одного индивидуума (варианта ключа).

При значительном объеме популяции для определения функции пригодности индивидуумов можно использовать эффективный принцип организации специализированных вычислений — принцип конвейера [12]. Общая схема реализации потока операций на последовательном конвейере и описание процесса реализации представлены в [9].

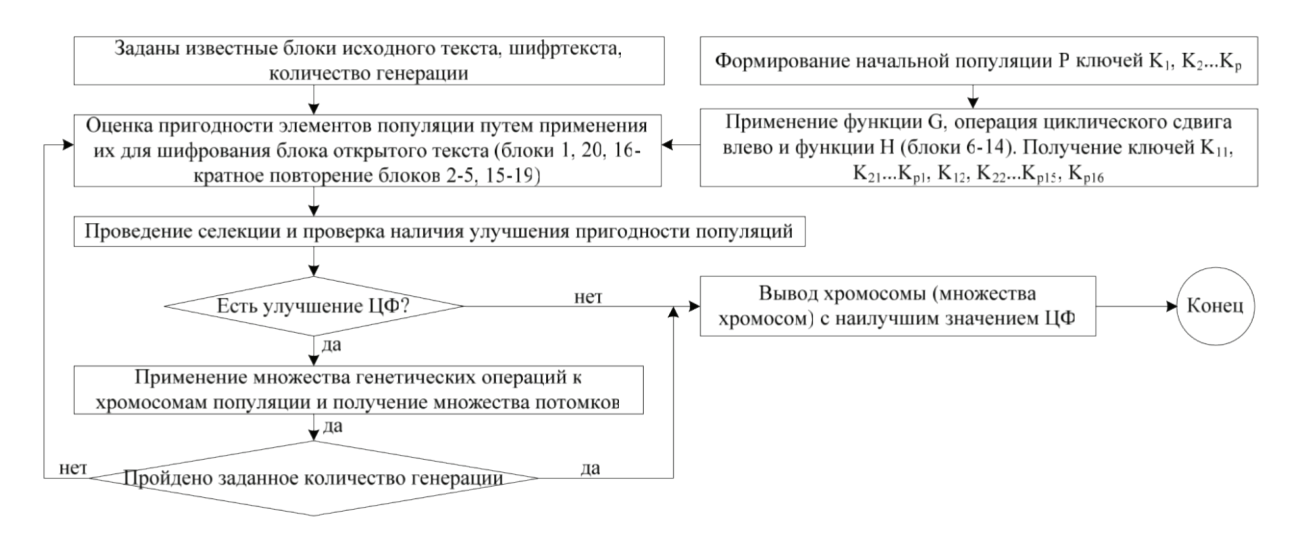


Рис. 3. Структурная схема генетического алгоритма

Таким образом, после разработки параллельной схемы реализации криптоанализа актуальной является задача: для алгоритма шифрования, используемого для оценки пригодности элементов популяции ключей, на основе построенного информационно-логического графа G и для заданного времени $T_{зад}$ найти необходимое наименьшее число процессоров однородной вычислительной системы и план выполнения операторов на них. Для решения этой задачи также использовались методы, изложенные в [10, 11], а ее решение представлено в [13]. При этом на основе визуальной методики [11] получена минимальная оценка числа процессоров n=2 при критическом пути в графе G $T_{кр}$=24, заданном времени $T_{зад}$=$T_{кр}$ и показано, что эта оценка является минимальной, а также определен план выполнения операторов.

На основе построенной параллельной схемы алгоритма разработан метод криптоаналитической атаки второго

типа. Алгоритм и его программная реализация включают следующие этапы:

1. Генерация популяции ключей по 64 бита (размер определяется экспериментально).
2. Оценка каждого элемента (ключа) популяции (блок CheckQuality).
3. Сортировка ключей по степени пригодности (блок QualitySolutionSort).
4. Проведение генетических операций (кроссинговер 80%, мутация и инверсия 0,05%).
5. Оценка расширенной популяции.
6. Сокращение популяции на 20% путем отсечения самых худших индивидуумов.
7. Возврат к 3.

Процесс заканчивается либо по истечении временного ресурса, либо по достижении оптимального или квазиоптимального варианта ключа.

Экспериментальные результаты. Приведем описание некоторых экспериментальных результатов, полученных при реализации ГА криптоанализа, проводимого с использованием процессора CORE I5-2400. Результаты для двух серий экспериментов представлены в таблицах 1, 2. При реализации эксперимента задавались следующие параметры: размер начальной популяции — 1000; количество итераций — 100; норма мутации и инверсии — 0,05; тип кроссинговера — простой двухточечный.

Таблица 1

Результаты сходимости ГА криптоанализа при 1 генерации

0	1000	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
1	1800	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
4	5372	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
5	7735	25,0	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
8	23094	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
17	614816	37,5	37,5	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
18	885334	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	25,0	25,0	25,0
20	1835828	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
22	3806771	50,0	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
23	5481748	50,0	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
25	11366950	50,0	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
30	23681145	62,5	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	37,5	37,5	37,5	37,5

В 1 столбце таблиц показан номер итерации, во 2 столбце — количество хромосом, подвергнувшихся мутации и инверсии, столбцы с 3 по 12 значение процента для 10 лучших хромосом популяции, определяющего совпадение полученного текста с исходным. Как видно из таблицы, на 25 генерации наилучшая хромосома обеспечивает совпадение полученного текста с исходным на 50%, на 30 генерации — на 62,5%.

Таблица 2

Результаты сходимости ГА криптоанализа при 2 генерации

0	1000	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
1	1800	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
4	5372	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
5	7735	25,0	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
8	23094	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
15	294570	37,5	37,5	37,5	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
16	423775	50,0	37,5	37,5	37,5	37,5	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
17	614816	50,0	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	25,0	25,0	25,0	25,0
18	877847	50,0	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	25,0	25,0	25,0	25,0
20	1818165	50,0	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
21	2618158	50,0	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
25	11360920	50,0	50,0	50,0	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
30	23681145	62,5	62.5	50,0	50,0	50,0	50,0	37,5	37,5	37,5	37,5

Время реализации алгоритма для получения квазиоптимального ключа составило при одноточечном кроссинговере (мутации и инверсии 5%) 53 мин., при кроссинговере по маске 29 мин., при двухточечном кроссинговере 55 мин., что значительно меньше временных затрат при реализации дифференциального криптоанализа, приведенного в [14].

Приведем результаты эксперимента по определению квазиоптимального ключа, обеспечивающего максимальное совпадение полученного текста с исходным. В качестве исходного был использован следующий текст:
«я_вас_любил:_любовь_еще,_быть_может,_в_душе_моей_угасла_не_совсем;_но_пусть_она_вас_больше_не_тревожи
т;_я_не_хочу_печалить_вас_ничем.___»

При реализации алгоритма криптоанализа путем разбиения исходного текста на 8-буквенные блоки и использовании параллельного вычислительного процесса был определен квазиоптимальный ключ, обеспечивающий получение следующего текста:
«я*в*с*любил***юб*вь*еще**б*ть_*оже***в_д*ше*м*ей_**асла*не**овс*м*_н*_*ус*ь*о*а_в*с*бол**е_н*_т*ев*
ж*т;*я*н**хочу_п*ч*л*т*_ва*_**че*.__*»

Как можно заметить, полученный текст достаточно близок к исходному (совпадение в пределах 62,5%), содержит осмысленные слова (хочу, любил) или почти осмысленные (т*ев*ж*т, п*ч*л*т), из чего следует, что процесс расшифрования (например, при использовании ГА для криптоанализа первого типа) может быть доведен до конца вручную (аналогично тексту, полученного при использовании квазиоптимального ключа в ГА, описанном в [15]).

При втором эксперименте в качестве исходного был использован следующий текст:
«жил_старик_со_своею_старухой_у_самого_синего_моря;_они_жили_в_ветхой_землянке_ровно_тридцать_лет_и_три
_года._старик_ловил_неводом_рыбу,_старуха_пряла_свою_пряжу._раз_он_в_море_закинул_невод,_-
_пришел_невод_с_одною_тиной.____»

При реализации алгоритма криптоанализа и использовании параллельного вычислительного процесса был определен квазиоптимальный ключ, обеспечивающий получение следующего текста:
«жи*_с*а*и*_с*_сво*ю_*т*ру*ой_у_с**ог*_си*е*о_мо*я**о*и_**ли_в_в*тхо**з*мля*к*_р*вн**три**ат**лет*и_тр
и***да.*с*а*и*_лов*л*н*в*до*_рыб*,**та*уха**ряла*с**ю_*ряж*._р*з*о*_в*мор**зак***л_н*вод*_*_***шел_**во
д_с**дною*т*ной*__**»

Таким образом, при размере начальной популяции N=1000 был определен квазиоптимальный ключ, что свидетельствует о возможности экспериментального выбора параметров ГА. При экспериментальной реализации использовались простой одноточечный кроссинговер, кроссинговер по маске, двухточечный кроссинговер с нормой 80%, простая точковая мутация с нормой 5%. В процессе реализации ГА после формирования множества потомков и проведения генетических операций использовался элитный отбор для доведения размера популяции до исходного состояния. В случае, если при реализации алгоритма криптоанализа был определен квазиоптимальный ключ, обеспечивающий совпадение полученного текста с исходным на 62,5% и более, результат криптоанализа считался достигнутым.

Заключение. Описано применение ГА для реализации криптоанализа блочных криптосистем, приведены результаты эксперимента при реализации криптоанализа второго типа алгоритма DES на основе параллельной схемы его реализации. Временные затраты алгоритма не превосходят временных затрат при реализации известных методов криптоанализа. Как показали результаты эксперимента, полученные результаты по определению оптимального ключа (при криптоанализе второго типа) в общем случае в значительной степени зависят от длины исходного текста, что может привести к эффективному использованию вычислительных систем, допускающих параллельную обработку информации (в частности, многопроцессорных систем класса SIMD).

Библиографический список

1. Чернышев, Ю. О. Криптографические методы и генетические алгоритмы решения задач криптоанализа / Ю. О. Чернышев, А. С. Сергеев, Е. О. Дубров, О. П. Третьяков. — Краснодар : ФВАС, 2013. — 138 с.

2. Авдошин, С. М. Криптоанализ : современное состояние и перспективы развития / С. М. Авдошин, А. А. Савельева // Информационные технологии. — 2007. — № 3. — С. 1–32.

3. Бабенко, Л. К. Современные алгоритмы блочного шифрования и методы их анализа / Л. К. Бабенко, Е. А. Ищукова. — Москва : Гелиос АРВ, 2006. — 376 с.

4. Чернышев, Ю. О. Обзор алгоритмов решения задач криптоанализа на основе биоинспирированных технологий искусственного интеллекта / Ю. О. Чернышев, А. С. Сергеев, Е. О. Дубров // Вестник Воронеж. гос. ун-та. — 2014. — № 2. — С. 83–89.

5. Сергеев, А. С. О возможности применения методов генетического поиска для реализации криптоанализа асимметричного алгоритма шифрования данных *RSA* / А. С. Сергеев // Известия ВУЗов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. — 2008. — № 3. — С. 48–52.

6. Чернышев, Ю. О. Применение биоинспирированных алгоритмов оптимизации для реализации криптоанализа классических и асимметричных криптосистем / Ю. О. Чернышев, А. С. Сергеев, Е. О. Дубров // Информатика : проблемы, методология, технологии : материалы XIV междунар. науч.-метод. конф. — Воронеж, 2014.

— С. 206–210.

7. Сергеев, А. С. Биоинспирированные методы криптоанализа асимметричных алгоритмов шифрования на основе факторизации составных чисел / А. С. Сергеев, О. П. Третьяков, А. Е. Васильев, Ю. О. Чернышев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 9(60). — С. 1544–1554.

8. Чернышев, Ю. О. Исследование возможности применения бионических методов пчелиных колоний для реализации криптоанализа классических шифров перестановок / Ю. О. Чернышев, А. С. Сергеев, Е. О. Дубров, А.Н. Рязанов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 1(76). — С. 62–75.

9. Сергеев, А. С. Исследование и разработка методов генетического поиска для организации криптоанализа блочных криптосистем в системах управления безопасностью и защиты информации на примере стандарта шифрования *DES* / А. С. Сергеев // Третья междунар. конф. по проблемам управления : пленарные доклады и избранные труды. — Москва, 2006. — С. 328–335.

10. Барский, А. Б. Планирование параллельных вычислительных процессов / А. Б. Барский. — Москва : Машиностроение, 1980. — 191 с.

11. Сергеев, А. С. Параллельное программирование / А. С. Сергеев. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2002. — 77 с.

12. Воеводин, В. В. Математические модели и методы в параллельных процессах / В. В. Воеводин. — Москва : Наука, 1986. — 296 с.

13. Сергеев, А. С. Разработка генетического метода криптоанализа блочных криптосистем и исследование возможности их параллельной реализации в системах защиты информации на примере стандарта *DES* / А. С. Сергеев // Системный анализ в проектировании и управлении : тр. 10 междунар. науч.-практ. конф. — Санкт-Петербург, 2006. — С. 258–265.

14. Бабенко, Л. К. Применение параллельных вычислений при решении задач защиты информации / Л. К. Бабенко, Е. А. Ищукова, И. Д. Сидоров // Программные системы : теория и приложения. — 2013. — № 3(17). — С. 25–42.

15. Морозенко, В. В. Генетический алгоритм для криптоанализа шифра Вижинера / В. В. Морозенко, Г. О. Елисеев // Вестник Пермск. гос. ун-та. Серия : Математика. Механика. Информатика. — 2010. — № 1. — С. 75–80.

References

1. Chernyshev, Y.O., Sergeyev, A.S., Dubrov, E.O., Tretyakov, O.P. Kriptograficheskie metody i geneticheskie algoritmy resheniya zadach kriptoanaliza. [Cryptographic methods and genetic algorithms for solving cryptanalysis problems.] Krasnodar: FVAS, 201, 138 p. (in Russian).

2. Avdoshin, S.M., Savelieva, A.A. Kriptoanaliz: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya. [Cryptanalysis: Current State and Future Trends.] Information Technologies, 2007, no. 3, pp. 1–32 (in Russian).

3. Babenko, L.K., Ishchukova, E.A. Sovremennye algoritmy blochnogo shifrovaniya i metody ikh analiza. [Modern block encryption algorithms and methods of their analysis.] Moscow: Gelios ARV, 2006, 376 p. (in Russian).

4. Chernyshev, Y.O., Sergeev, A.S., Dubrov, E.O. Obzor algoritmov resheniya zadach kriptoanaliza na osnove bioinspirirovannykh tekhnologiy iskusstvennogo intellekta. [Review of the algorithms cryptanalysis on the basis bioinspired methods of artificial intelligence.] Proceedings of Voronezh State University, 2014, no. 2, pp. 83–89 (in Russian).

5. Sergeyev, A.S. O vozmozhnosti primeneniya metodov geneticheskogo poiska dlya realizatsii kriptoanaliza asimmetrichnogo algoritma shifrovaniya dannykh RSA. [On applicability of genetic search methods for the implementation of asymmetric data RSA encryption algorithm cryptanalysis.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Technical Sciences. 2008, no. 3, pp. 48–52 (in Russian).

6. Chernyshev, Y.O., Sergeyev, A.S., Dubrov, E.O. Primenenie bioinspirirovannykh algoritmov optimizatsii dlya realizatsii kriptoanaliza klassicheskikh i asimmetrichnykh kriptosistem. [Application of bioinspired optimization algorithms for the implementation of classic and asymmetric cryptosystem cryptanalysis.] Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii: materialy XIV mezhdunar. nauch.-metod. konf. [Computer science: problems, methodology, technologies: Proc. XIV Int. Sci.-Method. Conf.] Voronezh, 201, pp. 206–210 (in Russian).

7. Sergeyev, A.S., Chernyshev, Y.O. Bioinspirirovannye metody kriptoanaliza asimmetrichnykh algoritmov shifrovaniya na osnove faktorizatsii sostavnykh chisel. [Cryptanalysis bioinspired methods of asymmetric key on the basis of composite number factorization.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 9(60), pp. 1544–1554 (in Russian).

8. Chernyshev, Y.O., Sergeyev, A.S., Dubrov, E.O., Ryazanov, A.N. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya bionicheskikh metodov pchelinykh koloniy dlya realizatsii kriptoanaliza klassicheskikh shifrov perestanovok. [Research on applicability of bionic techniques of artificial bee colonies for implementation of classical transposition cipher cryptanalysis.]

Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 1(76), pp. 62–75 (in Russian).

9. Sergeyev, A.S. Issledovanie i razrabotka metodov geneticheskogo poiska dlya organizatsii kriptoanaliza blochnykh kriptosistem v sistemakh upravleniya bezopasnost'yu i zashchity informatsii na primere standarta shifrovaniya DES. [Research and development of genetic search methods for the organization of block cryptosystem cryptanalysis in the safety management systems and data protection using an example of the standard DES encryption.] Tret'ya mezhdunar. konf. po problemam upravleniya : plenarnye doklady i izbrannye trudy. [III Int. Conf. on control problems: plenary paperss and selecta.] Moscow, 2006, pp. 328–335 (in Russian).

10. Barskiy, A.B. Planirovanie parallel'nykh vychislitel'nykh protsessov. [Planning of parallel computing processes.] Moscow: Mashinostroenie, 198, 191 p. (in Russian).

11. Sergeyev, A.S. Parallel'noe programmirovanie. [Parallel programming.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2002, 77 p. (in Russian).

12. Voyevodin, V.V. Matematicheskie modeli i metody v parallel'nykh protsessakh. [Mathematical models and methods in parallel processes.] Moscow: Nauka, 1986, 296 p. (in Russian).

13. Sergeyev, A.S. Razrabotka geneticheskogo metoda kriptoanaliza blochnykh kriptosistem i issledovanie vozmozhnosti ikh parallel'noy realizatsii v sistemakh zashchity informatsii na primere standarta DES. [Development of the genetic method of block cryptosystem cryptanalysis and feasibility study of their parallel implementation in information security systems on the example of DES standard.] Sistemnyy analiz v proektirovanii i upravlenii: tr. 10 mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [System analysis in the design and management: Proc. X Int.-Pract. Conf.] St. Petersburg, 2006, pp. 258–265 (in Russian).

14. Babenko, L.K. Ishchukova, E.A., Sidorov, I.D. Primenenie parallel'nykh vychisleniy pri reshenii zadach zashchity informatsii. [Application of parallel calculations at the solution of information protection problems.] Program Systems: Theory and Applications, 2013, no. 3(17), pp. 25–42 (in Russian).

15. Morozenko, V.V., Eliseev, G.O. Geneticheskiy algoritm dlya kriptoanaliza shifra Vizhinera. [A genetic algorithm for cryptoanalysis of Vigener's cipher.]Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science. 2010, no. 1, pp. 75–80 (in Russian).

Поступила в редакцию 08.04.2015
Сдана в редакцию 08.04.2015
Запланирована в номер 30.06.2015

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
PROCESSES AND MACHINES OF AGRO - ENGINEERING SYSTEMS



УДК 639.331.3:639.3.06 DOI 10.12737/12601

Факторы конструктивной оптимизации процессов в аппаратах вихревого слоя*

Н. А. Гиль[1], В. П. Жаров[2], Е. А. Смехунов[3]**
[1, 2, 3] Донской государственный технический университет, г. Ростов на Дону, Российская Федерация

Factors of constructive process optimization in velocity-layer devices***

N. A. Gil[1], V. P. Zharov[2], E. A. Smekhunov[3]**
[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы является обоснование принципиальных параметрических решений, позволяющих создать оборудование для обогащения воды кислородом в замкнутых системах водоснабжения. При этом предполагается достигать эффекта обеззараживания, исключая добавление кислорода в воду из специальных емкостей. Объектом исследования выбраны аппараты вихревого слоя (АВС), обладающие рядом преимуществ. В известных разработках этих аппаратов по ряду принципиальных решений есть вопросы, не определена действенность факторов, влияющих на процесс обогащения воды кислородом. В качестве методов исследования использованы логический анализ существующих сведений по процессам, происходящим в АВС; аналитические методы решения задач; отсеивающие исследования по влиянию отдельных факторов с использованием известного контрольного оборудования; статистическая обработка данных. В результате выполненной работы определены наиболее значимые факторы, действующие в аппаратах вихревого слоя. Поисковые и отсеивающие эксперименты показали, что наибольшее влияние на процессы обогащения воды кислородом и обеззараживания воды для аквакультуры оказывают кавитация и наличие в камере обработки свободного воздуха. Кроме того, для снижения энергетических потерь зазоры между магнитопроводами должны быть максимально уменьшены. Результаты проведенных экспериментов позволили предложить конструкцию, обеспечивающую преобладание указанных факторов при обработке сточной воды для аквакультуры.

Ключевые слова: аквакультура, аппарат вихревого слоя, обогащение воды кислородом, вращающееся магнитное поле, ферромагнитные стержни, кавитация.

The work objective is to study the fundamental parametric solutions to create the equipment for the oxygen enrichment of water in the closed water systems in recycling. It is assumed to achieve the effect of disinfection excluding the addition of oxygen into water from special containers. For a variety of advantages, velocity-layer devices (VLD) are chosen as a target of research. In the known development of these devices there are some questions on the fundamental solutions; besides, the effectiveness of factors for the oxygen enrichment of water is not determined. The logical analysis of the existing data on the processes taking place in the VLD, analytical methods of problem-solution, screening studies on the impact of some factors by applying a known control equipment, and statistical data processing, are used as research techniques. As a result of the work performed, the most significant factors operating in the velocity-layer devices are identified. The searching and screening experiments have shown that the cavitation and occurrence of free air in the treatment chamber have the greatest impact on the oxygen enrichment of water and the water disinfection for aquaculture. Besides, to reduce energy losses, the gaps between the magnetic conductors should be reduced as much as possible. The results of these experiments allow offering the design that provides the prevalence of the mentioned factors in the treatment of the wastewater for aquaculture.

Keywords: aquaculture, velocity-layer device, oxygen enrichment of water, the rotating magnetic field, ferromagnetic rods, cavitation.

Введение. Мировое производство искусственно выращиваемой рыбы (аквакультура) увеличивается ежегодно почти на 6 %. Для сравнения можно привести соответствующие данные, например, по домашней птице — 4 % и по свинине

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: gilka_77@mail.ru, spu-42.4@donstu.ru, smehunov@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

— 1,7 %. В 2014 году мировое производство рыбы составило 158 млн т. Почти половина этого количества — 66 млн т выращивается в искусственных условиях. Аквакультура развивается и в России, и во всем мире [1]. В 2014 году в рыбоводческих хозяйствах нашей страны выращено 3,68 млн т рыбы.

Обеспечение в бассейне постоянной температуры, состава воды и содержания в ней кислорода позволяет достичь наилучших показателей по скорости выращивания, экономному расходу воды, кормов, экологичности. Если выращивание одного килограмма рыбы в естественных условиях требует 650 л воды, то в бассейне — только 9 л [2]. Однако выращивание рыбы в бассейнах с поддержанием определенной бактериальной среды затрудняется рядом факторов, в частности требует существенных затрат. В России не производится оборудование, позволяющее обеззараживать и обогащать кислородом воду для аквакультуры. Отечественное рыбоводство зависит от поставок импортной техники — дорогостоящей и не всегда высокоэффективной. Это тормозит развитие производства рыбы в искусственных условиях.

Данная работа посвящена вопросам создания оборудования для обогащения воды кислородом в замкнутых системах водоснабжения. При этом в качестве обязательного свойства такого оборудования рассматривается наличие эффекта обеззараживания без необходимости добавления кислорода в воду из специальных емкостей.

Используемое в аквакультуре оборудование для обеззараживания и обогащения кислородом воды должно соответствовать определенным требованиям:
— относительная простота конструкции;
— возможность производства оборудования в России из отечественных комплектующих;
— уровень производительности, достаточный для обслуживания существующих и перспективных рыбоводческих хозяйств;
— сочетание обогащения кислородом с такими полезными эффектами, как обеззараживание, фильтрация;
— исключение вредных эффектов: повышение содержания в воде азота, железа, хлора и т. п.;
— приемлемая энергоемкость процессов;
— экономическая эффективность.

Выполнить эти требования, основываясь только на существующих технологиях и оборудовании, невозможно.

До сих пор физическая сущность явлений, происходящих в аппаратах вихревого слоя (АВС), до конца не выяснена [3]:
— не ясна роль отдельных факторов воздействия на воду при обработке;
— не проработано теоретическое обоснование оптимизации процесса обработки воды во вращающемся магнитном поле;
— отсутствует принципиальное конструктивное решение по снижению удельной энергоемкости аппаратов вихревого слоя (другой используемый термин — установка активизации процессов, УАП) за счет уменьшения паразитного выделения тепла;
— АВС (УАП) не рассматривались как оборудование для обогащения воды кислородом.

Постановка задач:
— выявить среди факторов, действующих в УАП, наиболее существенные;
— определить способ регулирования существенных факторов;
— найти конструктивные пути повышения воздействия существенных факторов на процессы обеззараживания и обогащения воды кислородом.

Методы исследования:
— логический анализ имеющихся сведений по процессам, происходящим в УАП;
— аналитические методы решения задач;
— отсеивающие исследования по влиянию отдельных факторов с использованием известного контрольного оборудования;
— статистическая обработка данных.

Содержание кислорода определялось оксиметром, уровень кавитации — кавитометром.

При исследовании принят ряд допущений, которые не оказывают существенного влияния на результат рассмотрения процессов, но позволяют упростить проведение замеров и последующую обработку результатов.

За среднюю скорость движения ферромагнитной частицы принята скорость ее центра тяжести. Небольшое повышение температуры воды (1–3 ^{0}C) при обработке не влияет на растворимость кислорода. При этом переход части металла с ферромагнитных стержней в воду не влияет на ее свойства, процессы обеззараживания и насыщения воды кислородом.

Во внимание принимались эффекты, проявляющиеся в период от нескольких десятков секунд до минуты, что не противоречит требуемому технологией аквакультуры условию поточности обработки воды.

Общие положения. Аппараты вихревого слоя достаточно хорошо исследованы [4, 5], разработаны конструкции с цилиндрическими и аксиальными активными частями (рис. 1), найдены их рациональные параметры, предложены [6, 7] и реализованы различные конструкции.

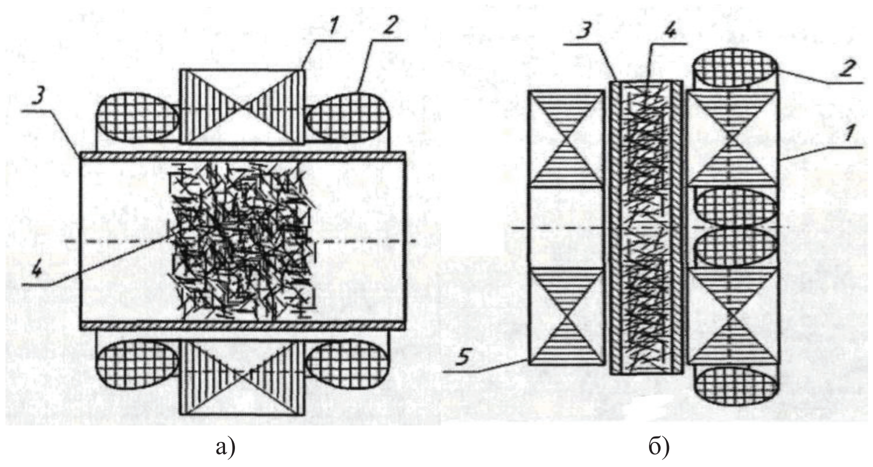


Рис. 1. Аппараты вихревого слоя с радиальными активными частями — цилиндрические аппараты (патенты [8, 9] и др.)
(а): с аксиальными активными частями — аксиальные аппараты (патент [10] и др.)
(б): 1 — индуктор, 2 — обмотка, 3 — рабочая камера, 4 — ферромагнитные стержни, 5 — аксиальный магнитопровод

В АВС можно установить повышение содержания кислорода при обработке воды, определить причину этого явления и добиться требуемых значений. Что же касается УАП, то их можно использовать в технологических линиях аквакультуры по подготовке возвратной воды.

Если исследовать аппараты вихревого слоя как черный ящик и разрабатывать статистические модели, используя метод планирования эксперимента, то такие модели описывают только конкретные исследуемые установки, и их нельзя использовать для других конструкций. Соответственно, и оптимизировать можно только исследуемую установку. Конструкции этих типов аппаратов еще не установились, нет какой-то общепринятой схемы. Поэтому установки в зависимости от назначения, требований к выполняемому процессу и наличия ресурсов изготавливаются с цилиндрическим или аксиальным расположением обмоток, одной или несколькими зонами воздействия на обрабатываемый материал. В качестве обмотки электромагнитов в УАП чаще используются статоры асинхронных электродвигателей или им подобные, в которых из-за уменьшения сопротивления самоиндукции резко возрастают пусковой и рабочий токи. При отсутствии якоря в УАП выделяется большое количество тепла, и обязательное жидкостное охлаждение увеличивает энергозатраты. В таких условиях параметрическая оптимизация без конструктивной бесперспективна.

Ряд исследований, в том числе наши эксперименты [11, 12], позволили установить следующие факты.

1. Под воздействием электромагнитного поля (в зоне вихревого слоя) УАП ферромагнитные стержни вращаются, совершая возвратно-петлевые движения, перемешиваются и соударяются. Это является причиной ускорения физико-химических реакций и физико-механических процессов и, соответственно, их производных. Вследствие этого наблюдаются эффекты измельчения делимых частиц и обеззараживание.

2. Поток среды движется и разгоняется силой, возникающей в ферромагнитных стержнях при воздействии на них вращающегося магнитного поля. Вращающееся движение среды (воды, газа, жидкого навоза и др.) создается гребным действием ферромагнитных элементов, хаотично вращающихся с переменной угловой скоростью. Удельная энергия вращающегося электромагнитного поля весьма велика и достигает 10 кВт/м [4].

3. Магнитное поле влияет на воду не только непосредственным образом (структурирование водяных кластеров и некоторое силовое воздействия на них), но также вызывает иррегулярное вращательное движения стержней и их столкновения. Отмечаются прямые и скользящие удары, трение (как между стержнями, внешними стенками камеры, так и с обрабатываемым веществом). Поэтому скорости соседних струй потока могут существенно различаться. Следовательно, в микрообластях создаются перепады давления, сопровождаемые кавитацией [13]. Схлопывание кавитационных каверн разрушающе действует на примеси и микрофлору [14], меняет свойства обрабатываемой воды.

4. Обрабатываемая среда (в нашем случае — вода) движется по трубе при определяющем воздействии на нее хаотично вращающихся ферромагнитных стержней. От 1/2 до 1/3 объема трубы занимает воздух. Он увлекается пото-

ком воды, распадается на мелкие пузырьки, смешиваясь с водой. Создаются условия для растворения и повышения концентрации в воде кислорода воздуха.

5. Магнитное поле оказывает определенное влияние на ферромагнитные стержни. Каждый стержень во вращающемся магнитном поле является ярко выраженным магнитом. При их вращении происходит смена полярности на полюсах, т. е. стержни перемагничиваются. При этом возникает явление магнитострикции, что влечет за собой изменение линейных размеров частиц, которое происходит с очень высокой скоростью, порождая дополнительную кавитацию в жидкости.

Во вращающемся магнитном поле движущиеся стержни на короткое время создают замкнутые цепи, которые под воздействием внешнего поля индуцируют токи, нагревающие частицы до значительной температуры. Кроме того, при разрыве цепей появляются электроразряды. Указанные явления способствуют нагреву среды, ее ионизации.

6. Магнитный поток проходит от одного полюса магнита через магнитопровод индуктора, затем через рабочую зону реакционной камеры и замыкается по магнитопроводу на другом полюсе. В рабочей зоне возникает вращающееся электромагнитное поле, увлекающее за собой ферромагнитные частицы. Из-за наличия больших зазоров рабочей зоны сопротивление магнитным силовым линиям возрастает, магнитная индукция значительно ослабевает, а энергия переходит в тепловую. Кроме того, в центре УАП отсутствует массивное ферромагнитное тело по типу якоря в асинхронном двигателе, в котором возникают токи и поле самоиндукции, препятствующие росту тока в обмотках статора. Ток с пониженным магнитным сопротивлением возрастает в 8–10 раз от номинального при обычной работе статора. Таким образом, обмотки перегреваются, возникает необходимость их охлаждения и, следовательно, непродуктивный расход энергии.

7. Для достижения достаточной производительности УАП, например 5–10 $м^3$/ч, скорость движения жидкости должна быть значительной — время обработки измеряется десятками секунд. Из этого следует исходить при изучении влияния отдельных факторов на степень обеззараживания и насыщения кислородом.

8. Содержание кислорода в воде — один из самых значимых факторов обеззараживания. Кислород разрушает оболочки микроорганизмов окислением. Кроме того, содержание кислорода в воде является сопутствующим индикатором при действии других обеззараживающих факторов — в частности, кислород выделяется при электрических разрядах в воде, при механической кавитации и др. Поэтому на первом этапе в опытах контролировалось только изменение количества растворенного кислорода.

Таким образом, гипотетически существенными факторами, влияющими на процесс обеззараживания и обогащения кислородом воды, могут быть:

— магнитное поле;
— электрические разряды;
— ультразвуковые волны, порожденные магнитострикцией стержней;
— механическая кавитация;
— физическое растворение при перемешивании кислорода воздуха, содержащегося в камере обработки;
— диссоциация молекул воды с выделением свободного кислорода.

Кроме перечисленных факторов необходимо учитывать время обработки и температуру. Известно, что растворимость кислорода в воде зависит от температуры. В табл. 1 приведены значения растворимости при давлении 0,101308 МПа.

Таблица 1

Нормальная концентрация кислорода в воде

Температура воды, С	0	10	20	30	40
Растворимость O_2, мг/дм	14,6	11,3	9,1	7,5	6,5

Очевидно, что проводить обработку воды с целью ее обогащения кислородом необходимо при возможно более низких температурах.

Растворение любого вещества в воде занимает время при определенном давлении, концентрации, перемешивании и пр. Соответствующие данные необходимо устанавливать в ходе исследования.

Результаты поисковых и отсеивающих экспериментов. Концентрация кислорода в воде К зависит от многих факторов, и эту зависимость можно представить в виде функции f. Серия однофакторных экспериментов была проведена с целью проверки значимости

$$K = f(I, H, M, l/d, T, Vo_2),$$

где *К*, мг/л — содержание кислорода в воде; *f* — обозначение функции в общем виде; *I,* А — сила тока; *H,* А/м — напряженность магнитного поля; *М*, г — масса ферромагнитных стержней; *l/d*, — отношение длины к диаметру стержней; *Т*, мин — время обработки; Vo_2 — количество доступного кислорода из окружающего воздуха.

При установлении возможной зависимости $K = f(I)$ через жидкость пропускался постоянный и переменный ток 220 В. При заметном выделении газа на электродах содержание кислорода за 1 минуту увеличилось на 0,5–1 мг/л, то есть в пределах ошибки измерения (водород не учитывался, так как его растворимость на порядки меньше растворимости кислорода).

Запуск установки без ферромагнитных стержней при наличии вращающегося магнитного поля не обеспечивает вращательное движение воды. В этом случае можно оценить действие одного поля. За контрольное время (1 мин) содержание кислорода в воде осталось на уровне 7,5–7,8 мг/л. Опыт проводился с постоянными магнитами с тем же результатом. При кратковременном воздействии напряженность магнитного поля в достижимых пределах не оказывает определяющего влияния на воду (которая является диамагнетиком), на изменение количества кислорода в воде и, соответственно, на жизнеспособность микроорганизмов.

Влияние соотношения *l/d* на процесс проверялось на нескольких конфигурациях. При *l* = *d* ферромагнитные шары диаметрами 2 мм и 3 мм не вращались. Вращение ферромагнитных тел в магнитном поле начинается при значительной разнице *l* и *d*. Так, при *d* = 2 мм использовались стержни 15, 25 и 30 мм (*l/d* = 7,5; 12,5 и 15). При этих значениях наблюдалось стабильное вращение стержней. Обработка продолжалась 1 минуту. В табл. 2 показано изменение значений содержания кислорода в водопроводной воде (начальная температура — 18 ^{0}С).

Таблица 2

Влияние отношения дины стержня к диаметру на процесс обогащения воды кислородом в УАП

№	*l/d* при *d* = 2 мм	Содержание кислорода, мг/л	
		Начальное	Конечное
1	7,5	7,8	8,8
2	12,5	7,9	8,4
3	15	7,8	8,6

При стабильном вращении стержней влияние больших значений *l/d* на изменение содержания кислорода неявное. Увеличивать *l* возможно в пределах беспрепятственного движения стержней в обрабатываемом потоке жидкости относительно диаметра трубы.

Суммарная масса стержней *М* должна быть соотнесена с массой обрабатываемой воды в единицу времени. Масса М влияет на время разгона воды до постоянной средней скорости. В случае, если масса воды постоянна и суммарная масса стержней достигает определенного предела (в описываемой установке — 40 г), характер их движения не меняется. При увеличении *М* до 50 и 100 г содержание кислорода увеличивается на постоянную величину, незначительно превышающую пределы статистической ошибки.

Средняя частота вращения стержней под действием электромагнитного поля составляет 700–1000 мин $^{-1}$, что значительно меньше скорости вращения поля (3000 мин $^{-1}$).

Количество кислорода увеличилось максимально (с 2,8 до 7,8 мг/л) при следующих условиях:
— температура — 17 ^{o}С;
— наличие свободного пространства для воздуха;
— заполнение емкости обрабатываемой водой менее чем наполовину;
— свободный доступ воздуха в вертикальном положении камеры с аксиальными активными частями.

Следует отметить, что такой рост количества кислорода наблюдался при увеличении времени обработки до 8 минут и сочетался с кавитационными процессами.

В действующей УАП процессы значительно сложнее — и по комбинированности, и по эффектам (электромеханический износ стержней с выделением в воду компонентов стали, диссоциация воды из-за прохождения по ней тока и др.). Так, ультразвук кроме губительного воздействия на микроорганизмы порождает кавитацию. Кавитация вызывает также некоторую диссоциацию воды с выделением атомарного кислорода. Растворение атомарного кислорода может повышать его общее содержание в воде и одновременно убивать микроорганизмы. Тем не менее, перечисленные выше условия дают представление об основных явлениях в процессе обработки воды вращающимся электромагнитным полем, и проведенный теоретический анализ позволил предварительно ранжировать указанные факторы по степени значимости.

Для определения важности факторов времени и температуры обработки было проведено исследование по методике полного факторного эксперимента Бокса — Уилсона. Матрица планирования эксперимента и натуральные

значения факторов представлены в табл. 3. Функцией отклика является степень обогащения воды кислородом — *Yк*, мг/л, при начальном содержании кислорода *Yн*, мг/л.

Таблица 3

Влияние различных факторов на абсолютное и относительное содержания кислорода в воде

Рандомизированный	10	8	12	11	9	15	4	2	5	14	16	3	6	1	13	7
№ опытов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Факторы																
Время обработки воды, X_1, сек	60	60	20	20	60	60	20	20	60	60	20	20	60	60	20	20
Масса ферромагнитных стержней X_2, гр	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50
Температура воды начальная, X_3, ^{0}C	24	24	24	24	16,3	16,3	16,3	16,3	24	24	24	24	16,3	16,3	16,3	16,3
Выходные параметры																
Температура воды конечная, Y_T, ^{0}C	24	25,5	24,4	23,8	22,7	21,7	20,3	22,2	22,3	25,2	24,2	18,7	22,3	21,6	20,2	22
Степень содержания начального уровня кислорода, *Yн*, мг/л	5,3	5,3	5,3	5,3	7,7	7,7	7,7	7,7	5,3	5,3	5,3	5,3	7,7	7,7	7,7	7,7
Степень обогащения воды кислородом, *Yк*, мг/л	8,5	8,35	7,8	8,8	8	9,15	8,9	9,17	8,4	7,9	8,3	9,9	8,1	9,2	8,8	9,1

Факторами, изменяемыми в ходе эксперимента, были X_1 — время обработки, X_2 — масса ферромагнитных стержней, X_3 — начальная температура воды.

Для проведения каждого опыта использовалась заготовленная вода. Объем воды, ее состав, вязкость, плотность, кислотность не изменялись, так как на практике для рыбных бассейнов также берется вода из одного источника.

Пределы изменения факторов были взяты достаточно широкие и в то же время реальные, чтобы при изменении в выбранных границах максимум Y наверняка оказался внутри поверхности отклика.

Данные экспериментов обработаны по общепринятой методике. По результатам экспериментов построено уравнение регрессии процесса:

$$Y = Yк – Yн = 8{,}46 – 0{,}2X_1 – 0{,}298X_2 – 0{,}154X_3 + 0{,}098X_1X_2 + 0{,}008X_1X_2 + 0{,}054X_2X_3 + 0{,}308X_1X_2X_3.$$

Знаки «минус» перед коэффициентами факторов показывают, что для получения большей насыщенности не надо форсировать режимы обработки, чрезмерно увеличивать время воздействия, содержание ферромагнитных элементов и повышать температуру. Таким образом, анализ уравнения свидетельствует о возможности экономичной обработки воды.

Обращает на себя внимание значимость коэффициента при тройном взаимодействии факторов — $0{,}308X_1X_2X_3$. Это наводит на мысль о кумулятивном эффекте сочетания факторов. Совместное сочетание времени воздействия, массы ферромагнитных активирующих элементов и температуры дает более значимый эффект, чем отдельные факторы. Следовательно, если в УАП одновременно проявляется действие нескольких факторов, то уровень каждого отдельного воздействия может быть снижен, и, значит, обработка может проводиться в более экономичных режимах.

По результатам эксперимента видно, что холодная вода нагревается больше (в среднем на 5,3 ^{0}C), чем теплая (в среднем на 0,8 ^{0}C). Это означает, что при насыщении воды кислородом в зимний период она, изменяя температуру до Y_T, будет подогреваться. Летом же этот эффект будет практически незаметным.

Проведенные исследования позволили обоснованно и целенаправленно провести конструктивную оптимизацию устройства типа УАП, обеспечивающую требуемые параметры и режимы. В настоящее время оформляется патент на разработанное устройство.

Заключение. При функционировании УАП в процессе обогащения воды кислородом необходимо:

— обеспечить время воздействия в пределах 1 минуты;

— избегать подогрева воды в процессе обработки;

— создать условия для поступления в камеру обработки воздуха;

— усилить кавитационные процессы.

В предложенной установке определяющими факторами являются интенсивность кавитации и использование кислорода воздуха.

Библиографический список

1. Стратегия развития аквакультуры в Российской Федерации на период до 2020 года [Электронный ресурс] / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. — Режим доступа: http://www.mcx.ru/documents/document/show/12208.77.htm (дата обращения 21.07.15).

2. Проскуренко, И. В. Замкнутые рыбоводные установки / И. В. Проскуренко. — Москва : Издательство ВНИРО, 2003. — 152 с.

3. Вершинин, Н. П. Установки активации процессов / Н. П. Вершинин. — Ростов-на-Дону : Инноватор, 2004. — 96 с.

4. Логвиненко, Д. Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем / Д. Д. Логвиненко, О. П. Шеляков. — Киев : Техника, 1970. — 144 с.

5. Адошев, А. И. Выбор конструкции индуктора ферровихревого аппарата / А. И. Адошев // Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве : сб. науч. тр. — Ставрополь : Издательство Ставропольского государственного университета, 2009. — С. 72–77.

6. Water activation system with functions of disinfection and purification : patent KR, 20020097090 (A); 2002-12-31 / J.-H. Park.

7. Cavitation oxygenation disinfection running water apparatus of waterpower : patent CN, 201161946 (Y) ; 2008-12-10 / S. Xuan, W. Ppeizhi.

8. Аппарат вихревого слоя : патент 2072256 Рос. Федерация : B01F13/08 / Н. П. Вершинин [и др.] ; заявл. 15.10.1992 ; опубл. 27.01.1997.

9. Аппарат вихревого слоя : патент 2072257 Рос. Федерация : B01F13/08 / Н. П. Вершинин, И. Н. Вершинин ; заявл. 16.10.1992 ; опубл. 27.01.1997.

10. Ферровихревой аппарат : патент 2323040 Рос. Федерация : B01F13/08 / А. И. Адошев, В. В. Коваленко ; заявл. 25.12.2006 ; опубл. 27.04.2008.

11. Гиль, Н. А. Перспективы применения установки активизации процессов для подготовки воды для аквакультуры / Н. А. Гиль, Е. А. Смехунов, М. В. Коваленко // Технические средства аквакультуры : сб. трудов междунар. науч. конф. — Ростов-на-Дону : Издательство ДГТУ, 2014. — С. 142–143.

12. Гиль, Н. А. Обработка воды в установках замкнутого цикла / Н. А. Гиль, Е. А. Смехунов // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : мат-лы 16-й междунар. науч.-практ. конф. — Ростов-на-Дону, 2013. — С. 47–50.

13. Christopher, E.-B. Cavitation and Buble Dynamics / E.-B. Christopher. — New York : Oxford University Press, 1995. — 284 p.

14. Акопян, Б. В. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами. Ультразвук в медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии / Б. В. Акопян, Ю. А. Ершов. — Москва : Издательство МГТУ им. Баумана, 2005. — 224 с.

References

1. Strategiya razvitiya akvakul'tury v Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda. [Strategy of aquaculture development in the Russian Federation for the period until 2020.] Ministry of Agriculture of the Russian Federation. Available at: http://www.mcx.ru/documents/document/show/12208.77.htm (accessed: 21.07.15) (in Russian).

2. Proskurenko, I.V. Zamknutye rybovodnye ustanovki. [Closed fish-breeding units.] Moscow: Izdatel'stvo VNIRO, 2003, 152 p. (in Russian).

3. Vershinin, N.P. Ustanovki aktivatsii protsessov. [Process activation installations.] Rostov-on-Don: Innovator, 2004, 96 p. (in Russian).

4. Logvinenko, D.D., Shelyakov, O.P. Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v apparatakh s vikhrevym sloem. [Intensification of technological processes in the velocity-layer devices.] Kiev: Tekhnika, 1970, 144 p. (in Russian).

5. Adoshev, A.I. Vybor konstruktsii induktora ferrovikhrevogo apparata. [Selection of inductor design for ferro-vortex device.] Metody i tekhnicheskie sredstva povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya elektrooborudovaniya v promyshlennosti i sel'skom khozyaystve : sb. nauch. tr. [Methods and techniques to enhance the applicability of electrical equipment in industry and agriculture: Coll.of sci.papers.] Stavropol: Izdatel'stvo Stavropol'skogo gosudarstvennogo universiteta, 2009, pp. 72–77 (in Russian).

6. Park, J.-H. Water activation system with functions of disinfection and purification: Patent KR, no. 20020097090 (A), 2002.

7. Xuan, S., Peizhi, W. Cavitation oxygenation disinfection running water apparatus of waterpower: Patent CN, no. 201161946 (Y), 2008.

8. Vershinin, N.P., et al. Apparat vikhrevogo sloya: patent 2072256 Ros. Federatsiya: B01F13/08. [The vortex-layer device.] Patent RF, no. 2072256, 1997 (in Russian).

9. Vershinin, N.P., Vershinin, I.N. Apparat vikhrevogo sloya: patent 2072257 Ros. Federatsiya: B01F13/08. [The vortex-layer device.] Patent RF, no. 2072257, 1997 (in Russian).

10. Adoshev, A.I., Kovalenko, V.V. Ferrovikhrevoy apparat: patent 2323040 Ros. Federatsiya: B01F13/08. [The ferro-vortex device.] Patent RF, no. 2323040, 2008 (in Russian).

11. Gil, N.A., Smekhunov, E.A., Kovalenko, M.V. Perspektivy primeneniya ustanovki aktivizatsii protsessov dlya podgotovki vody dlya akvakul'tury [Application prospects of the revitalization process installation for water treatment for aquaculture.] Tekhnicheskie sredstva akvakul'tury: sb. trudov mezhdunar. nauch. konf. [Technical equipment for aquaculture: Proc. Int.Sci. Conf.] Rostov-on-Don, DSTU Publ. Centre, 2014, pp. 142–143 (in Russian).

12. Gil, N.A., Smekhunov, E.A. Obrabotka vody v ustanovkakh zamknutogo tsikla. [Water treatment at closed-cycle plants.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya : mat-ly 16-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [State and prospects of development of agricultural engineering : Proc. XVI Int. Sci.-Prac. Conf.] Rostov-on-Don, 2013, pp. 47–50 (in Russian).

13. Christopher, E.-B. Cavitation and Buble Dynamics. New York: Oxford University Press, 1995, 284 p.

14. Akopyan, B.V., Yershov, Y.A. Osnovy vzaimodeystviya ul'trazvuka s biologicheskimi ob"ektami. Ul'trazvuk v meditsine, veterinarii i eksperimental'noy biologii. [Fundamentals of the ultrasound – biological objects interaction. Ultrasound in medicine, veterinary medicine, and experimental biology.] Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. Baumana, 2005, 224 p. (in Russian)

Поступила в редакцию 11.05.2015
Сдана в редакцию 15.05.2015
Запланирована в номер 30.06.2015

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
PROCESSES AND MACHINES OF AGRO - ENGINEERING SYSTEMS



УДК 631.331.85:633.11 DOI 10.12737/12592

Технические параметры модифицированной сеялки для высева зерновых культур в тяжелые по механическому составу почвы*

И. Р. Антибас[1], А. Г. Дьяченко[2]**
[1,2] Донской государственный технический университет, г.Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Technical parameters of modified seed drill for sowing grain crops in heavy soils ***

I. R. Antypas[1], A. G. Dyachenko[2]**
[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы являлось создание новой конструкции сеялки, предназначенной для работ на тяжелых почвах. Основная задача модифицированной конструкции — устранение сложностей, возникающих при высеве, особенно когда в почве находятся остатки неубранного урожая, а на ее поверхности — пожнивные остатки от ранее возделанных культур. Эксперименты проводились при следующих варьируемых факторах: скорость движения сеялки, глубина обработки почвы, конструкция почвообрабатывающих рабочих органов, высота высевающих слотов и расстояние между ними, угол падения зерна, расстояние между корпусами рабочих органов, расстояние между слотом и стойкой рабочего органа. Результаты исследований позволяют утверждать, что применение модифицированной сеялки позволяет добиться более равномерного распределения зерна в почве. При этом урожайность повышается почти на 14 % и достигает уровня 86,7 %. Оптимальные параметры модифицированной конструкции следующие: расстояние между корпусом почвообрабатывающего орудия и высевающим отверстием слота — 50 см; угол падения высеваемого материала на почву из слотов — 60^0; высота падения зерен из слотов — 50 см; расстояние между отверстиями высевающих слотов — 17 см; скорость движения сеялки — 8 км/ч. При этом установлено, что для достижения наилучшего эффекта в качестве почвообрабатывающих орудий следует использовать жесткие стойки с крыльчатыми лапами.

Ключевые слова: сеялка, зерновые культуры, всхожесть, высевающий слот, вид рабочего органа.

The work objective is to create a new seeder designed to work in heavy soils. The main purpose of the modified design is the elimination of difficulties occurring at seeding, especially when there are crop remains in the soil, and former cultivated crop residues on its surface. Experiments were carried out under the following variable factors: seeder speed, operating depth, tillage tool design, seed slot height and distance between seed slots, angle of dropping grain, distance between tool hulls, and distance between the sowing slot and the tine. The research results suggest that the application of the modified seed drill allows improving the uniformity of the grain distribution in the soil. In this case, the yield is increased by almost 14% and reaches the level of 86.7%. The optimal parameters of the modified design include the following: the distance between the tillage tool body and the slot seed opening is 50 cm; the angle of dropping the seed material from the slots on the soil is 60^0; the height of the grain fall from the slots is 50 cm; the distance between the slot seed openings is 17 cm; the seeder speed is 8 km/h. It is found that tillage tools fitted with rigid props with vane shovels make the greatest effect.

Keywords: seed drill, white straw crops, germination, seeding slot, tool type.

Введение. В настоящее время в агропромышленном комплексе Сирийской Арабской Республики (САР) наибольшее внимание уделяется урожайности зерновых культур, обеспечивающей производство продуктов питания — в частности, хлебобулочных и макаронных изделий.

В последние 5 лет в САР отмечается прирост населения, что обусловило увеличение посевных площадей под зерновые культуры. Учитывая, что потребление хлебобулочных и макаронных изделий составляет около 200 кг/год на

---

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: Imad.antypas@mail.ru, Dyachenko_aleshka@bk.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

душу населения [1], весьма актуальной представляется проблема повышения урожайности зерновых культур. Решению этой задачи может способствовать разработка высокопроизводительной сеялки. Следует отметить, что на урожайность оказывают влияние следующие факторы:
— способ посева (посев обычным рассеиванием, посев в лунки квадратно-гнездовым способом, посев в борозду за почвообрабатывающим орудием и т. д.) [2];
— точность высева;
— скорость движения сеялки и пр.

Преимуществами автоматизации посева являются [3]:
— возможность исключить пропуски и неравномерности высева посевного материала,
— повышение производительности,
— снижение трудозатрат,
— экономия высеваемого зерна,
— улучшение всхожести,
— повышение точности посева при соблюдении заданной глубины,
— облегчение работы сельхозорудий на следующих этапах работы,
— обеспечение механизированной уборки пожнивных остатков [4, 5].

Очевидно также, что научно обоснованная модернизация сельскохозяйственного оборудования способна дать серьезный экономический эффект.

При модернизации сеялки важнейшей задачей является улучшение контроля плотности посева и равномерности распределения зерен в борозде по горизонту почвы и глубине [6]. Для обеспечения необходимых условий прорастания зерен были заданы следующие ограничения:
— зерна должны быть заделаны на глубину не более 2–3 см, что обеспечивает удовлетворительные параметры распределения зерна по глубине борозды и по горизонту почвы при скорости движения сеялки 4–5 км/час [7];
— процессу культивирования зерновых должны способствовать доступность кислорода и воды, качественное удобрение и надлежащая температура для лучшего их прорастания [8].

Находящаяся в верхнем плодородном слое почва в основном состоит из твердых частиц и пор, по которым свободно перемещаются вода и воздух. Такая почва считается более благоприятной средой для посева и роста корневой системы [9].

В целом, для АПК САР характерна проблема выбора сельскохозяйственной техники, в особенности для северных районов, где преобладают тяжелые по механическому составу почвы. Этим обусловлена необходимость модернизации посевных агрегатов. Опытным путем было доказано преимущество автоматизированного высева методом заделки зерна в борозду, что повышает всхожесть культур на 11 % по сравнению с обычным высевом [10].

Цель исследования. Новая конструкция сеялки призвана повысить эффективность высева при работе на тяжелой почве (табл. 1), особенно когда в ней находятся остатки неубранного урожая, а на поверхности — пожнивные остатки от ранее возделываемых культур.

Таблица 1

Физические характеристики почвы

Параметры почвы	Единица измерения	Значение
Состав грунта		
Глина	%	65,1
Ил	%	18,4
Песок	%	16,5
Свойства глинозема		
Органические вещества	%	0,98
Влажность	%	19,25
Кислотность (pH)	–	7,81
Электрическая проводимость (ЭП)	мСм	1,12

В числе основных проблем, с которыми сталкиваются сельхозпроизводители при использовании традиционных сеялок, следует отметить:
— забивание глиной передних частей рабочих органов сеялки, в результате чего прекращается процесс высева зерна;
— забивание глиной высевающих шлангов;

— скручивание высевающих шлангов из-за скапливания глины в передних частях рабочих органов сеялки, что также приводит к прекращению высева зерна;
— неравномерность высева;
— неравномерность заделки зерна.

Данные, полученные в результате исследования, были использованы при изучении конструкции модернизированной сеялки, которая, в отличие от традиционно используемого механизма, позволяет избежать перечисленных выше проблем.

Рассматривались факторы, оказывающие наибольшее влияние на всхожесть и равномерность распределения зерна в почве:
— глубина обработки почвы;
— угол падения зерна из высевающих слотов по отношению к почвенному горизонту;
— расстояние между высевающими отверстиями;
— конструкция рабочих органов, используемых для заделки зерен в почву;
— количество высеваемого материала;
— расстояние между корпусами рабочих органов;
— расстояние между высевающими слотами и рабочими органами;
— высота падения зерна из слотов на почву;
— скорость движения сеялки.

Материалы и методы исследования. Эксперименты проводились на полях опытной государственной фермы, расположенной в районе г. Алеппо Сирийской Арабской Республики в 2011–2012 гг.

В качестве тягового агрегата использован трактор класса 5 (К-700). Количество высеваемого зерна — 180 кг/га.

Основные цели модернизации:
— улучшение подготовки дна борозды;
— обеспечение доставки необходимого количества зерна на единицу площади.

Следует отметить, что усовершенствованная конструкция сеялки позволяет достичь указанных целей, несмотря на наличие в почве и на ее поверхности растительных остатков выращенных ранее культур. Исследование доказало преимущества новых рабочих органов, представляющих собой жесткие стойки с закрепленными на них крыльчатыми лапами, которые обеспечивают надлежащую заделку зерна в почву.

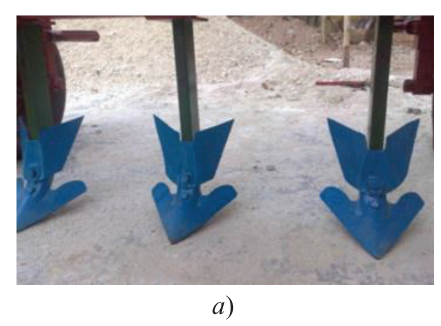
Новая конструкция сеялки была получена путем замены традиционных рыхлительных рабочих органов культиваторными лапами, а также изъятием резиновых шлангов зернопроводов (рис. 1).

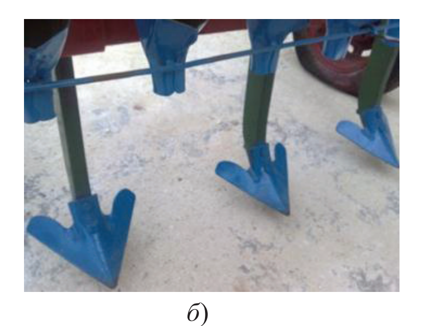


Рис. 1. Общий вид экспериментальной конструкции сеялки

Эксперименты проводили с целью выявления оптимальных параметров и режимов работы сеялки, а также изучения влияния на процесс всхожести и количества высеваемого зерна при следующих варьируемых факторах.

1. Скорость движения сеялки: 4, 6 и 8 км/ч.
2. Расстояние между высевающим слотом и стойкой рабочего органа: 25, 35 и 50 см.
3. Глубина обработки почвы: 5, 10 и 15 см.
4. Расстояние между корпусами рабочих органов: 30, 40 и 50 см.
5. Конструкция почвообрабатывающих рабочих органов: с традиционными рыхлящими рабочими органами и рабочими органами с крыльчатыми лапами [1] (рис. 2).





а) *б*)

Рис. 2. Конструкции используемых рабочих органов: с крыльчатыми лапами (*а*); с традиционными (*б*)

6. Угол падения зерна к почвенному горизонту: 45^0, 60^0 и 90^0 .
7. Высота слота, предназначенного для заделки зерна в почву: 30, 40 и 50 см.
8. Расстояние между высевающими слотами: 15, 17 и 20 см.

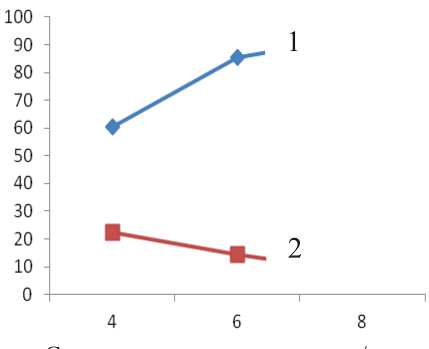
Опыты для исследования каждого из вышеназванных параметров воспроизводились трижды.

До начала исследования почва была подготовлена — обработана чизельным плугом на глубину 20 см и выровнена. Через 15 дней с момента посева был произведен расчет количества проросших зерен при помощи наложения деревянной рамки (1 × 1 м). Эксперимент повторялся пятикратно на пяти произвольно выбранных участках поля.

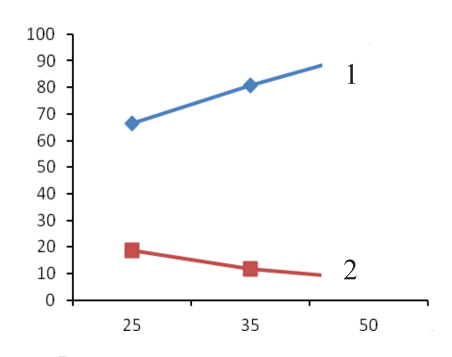
Для оценки всхожести зерна использовали специально разработанную методику. Она заключалась в следующем. Выборку (100 зерен) упаковывали в пластиковые контейнеры размерами 20 × 30 см. На дно каждого контейнера помещали стерильную вату, смоченную водой с формалином, накрывали нейлоном и оставляли при температуре 26 ^{0}С, пока зерна не прорастут. Через 8 дней проросшие зерна подсчитали и таким образом определили процент всхожести. Эксперимент проводили с 5 пробами зерен и повторяли 5 раз.

Обсуждение результатов. В ходе исследования было выяснено, каким образом различные параметры конструкции и функционирования оборудования влияют на всхожесть и распределение зерна в почве.

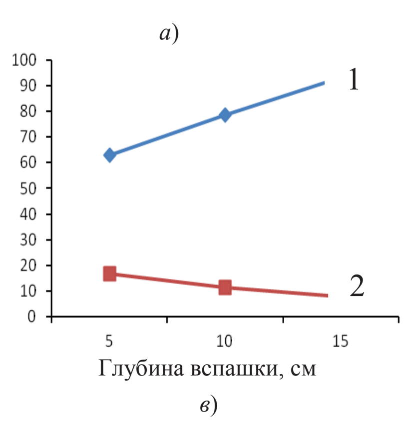
1. Скорость движения сеялки (рис. 3, *а*). Исследования проводились на трех скоростях (4, 6 и 8 км/ч) при следующих условиях: количество высеваемого материала — 180 кг/га; глубина обработки почвы — 15 см; расстояние между слотом и рабочим органом — 50 см; расстояние между рабочими органами — 50 см; рабочие органы представляют собой жесткие стойки с закрепленными на них крыльчатыми лапами; угол падения зерна к почвенному горизонту — 60^0; высота высевающего слота от поверхности почвы — 50 см; расстояние между высевающими слотами — 17 см.



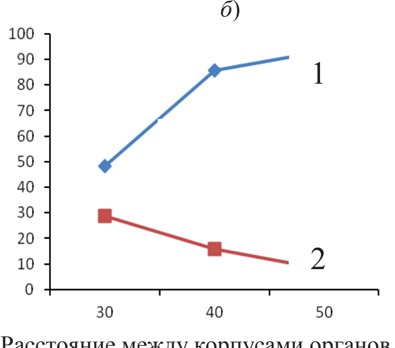
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Влияние на всхожесть скорости движения сеялки (*а*), расстояния между высевающим слотом и рабочим органом (*б*), глубины обработки почвы (*в*) и расстояния между корпусами рабочих органов (*г*): 1 — всхожесть (данные в процентах указаны по вертикальной оси), 2 — стандартное отклонение

Исследование позволило установить, что увеличение скорости движения сеялки существенно влияет на всхожесть. Это объясняется следующим образом. Если рабочие органы функционируют на большой скорости, крылья лучше отбрасывают почву, что способствует лучшей заделке высеваемого материала. В то же время при работе на низких скоростях (4 км/ч) рабочие органы не могут захватывать почву и отбрасывать ее в сторону, поэтому значительная часть посеянных зерен остается на поверхности почвы и съедается птицами и насекомыми, что, безусловно, ведет к существенным потерям урожая.

Итак, оптимальная скорость сеялки — 8 км/ч. Данный фактор увеличивает всхожесть на 32,8 %. Кроме того, посевной материал в почве распределяется более равномерно.

2. Расстояние между рабочим органом и высевающим слотом (рис. 3, *б*). В ходе эксперимента указанное расстояние составляло 25, 35 и 50 см. Другие условия: скорость хода сеялки — 8 км/ч; подача посевного материала — 180 кг/га; глубина обработки — 15 см; расстояние между корпусами рабочих органов — 50 см; рабочие органы в виде жестких стоек с закрепленными на них крыльчатыми лапами; угол падения зерна к почвенному горизонту — 60^0; высота слота над почвенным горизонтом — 50 см; расстояние между высевающими слотами — 17 см.

Установлено, что с увеличением расстояния между высевающим слотом и рабочим органом возрастает процент всхожести и равномерность распределения зерна в почве. При наименьшем расстоянии от слота до рабочего органа (25 см) значительная часть зерна останется не заделанной в почву. Важно отметить, что в данном случае зерно повреждается рабочими органами — и это снижает равномерность его распределения в почве. Наилучшие результаты были получены при наибольшем расстоянии между высевающим слотом и рабочим органом (50 см). Всхожесть увеличилась на 26,8 %, и зерно в почве распределялось более равномерно.

3. Глубина вспашки (рис. 3, *в*). Оптимальная глубина обработки почвы (5, 10 или 15 см) определялась при следующих условиях: скорость хода сеялки — 8 км/ч; подача посевного материала — 180 кг/га; расстояние между корпусами рабочих органов — 50 см; рабочие органы представляли собой жесткие стойки с закрепленными на них крыльчатыми лапами; угол падения зерна к почвенному горизонту — 60^0; расстояние от слота до почвы — 50 см; расстояние между высевающими слотами — 17 см.

В ходе эксперимента выяснилось, что увеличение глубины обработки до 15 см. — способствует лучшей заделке зерна в почву. Однако в данном случае отмечается некоторая задержка всхожести отдельных зерен. Этот факт объясняется следующим образом. При глубине заделки 5 см (т. е. минимальной) крылья рабочих органов не играют существенной роли, т. к. подрезанный слой почвы до них не доходит и не может покрыть зерна. С увеличением же глубины на зерна попадает большее количество почвы.

Итак, наилучшие результаты были получены при глубине обработки 15 см: всхожесть увеличилась на 30,4 %, зерно в почве распределялось более равномерно.

4. Расстояние между корпусами рабочих органов (рис. 3, *г*). В процессе исследования указанное расстояние составляло 30, 40 и 50 см. Эксперименты проводились при следующих условиях: скорость хода сеялки — 8 км/ч; подача посевного материала — 180 кг/га; глубина обработки почвы — 15 см; рабочие органы — жесткие стойки с закрепленными на них крыльчатыми лапами; угол падения зерна с почвенным горизонтом — 60^0; высота слота от почвы — 50 см; расстояние между высевающими слотами — 17 см.

Увеличение расстояния между корпусами рабочих органов до 50 см обеспечивает рост всхожести и равномерное распределение зерна в почве. В случаях же, когда расстояние было минимальным (30 см), наблюдалась экструзия почвы перед рыхлящими лапами. При этом на борозде образовывались так называемые колодцы, в которых за рыхлительными рабочими органами оставались не заделанные в почву зерна. Это привело к низкой всхожести растений и неравномерности их распределения. Та же проблема наблюдалась и при использовании традиционных рыхлительных рабочих органов.

Таким образом, исследования показали, что результаты можно улучшить, если между корпусами рабочих органов установить расстояние 50 см. При этом всхожесть увеличилась на 44,8 % и зерно распределялось лучше.

5. Вид используемых рыхлительных рабочих органов. В ходе исследования оценивалась эффективность органов с крыльчатыми лапами и без них. Эксперименты проводились при следующих условиях: скорость хода сеялки — 8 км/ч; глубина обработки почвы — 15 см; подача посевного материала — 180 кг/га; угол падения зерна с почвенным горизонтом — 60^0; расстояние между корпусами рабочих органов — 50 см; высота слота от почвы — 50 см; расстояние между высевающими слотами — 17 см.

Эксперимент подтвердил, что использование в качестве рыхлящих рабочих органов крыльчатых лап повышает всхожесть на 3,5 % и улучшает распределение зерна в почве, т. к. крылья хорошо распределяют почву по обеим сторонам по ходу движения и качественно заделывают зерна. Что же касается работы органов без крыльев, то в этом случае наблюдался выброс отдельных зерен на поверхность почвы и плохая их заделка.

6. Угол падения зерна к почвенному горизонту (рис. 4, *а*). В ходе исследования угол падения зерен к почвенному горизонту составлял 45^0, 60^0 и 90^0 при следующих условиях: скорость хода сеялки — 8 км/ч; подача посевного

материала — 180 кг/га; глубина обработки почвы — 15 см; рабочие органы — жесткие стойки с закрепленными на них крыльчатыми лапами; расстояние между корпусами рабочих органов — 50 см; расстояние от слота до почвы — 50 см; расстояние между высевающими слотами — 17 см.

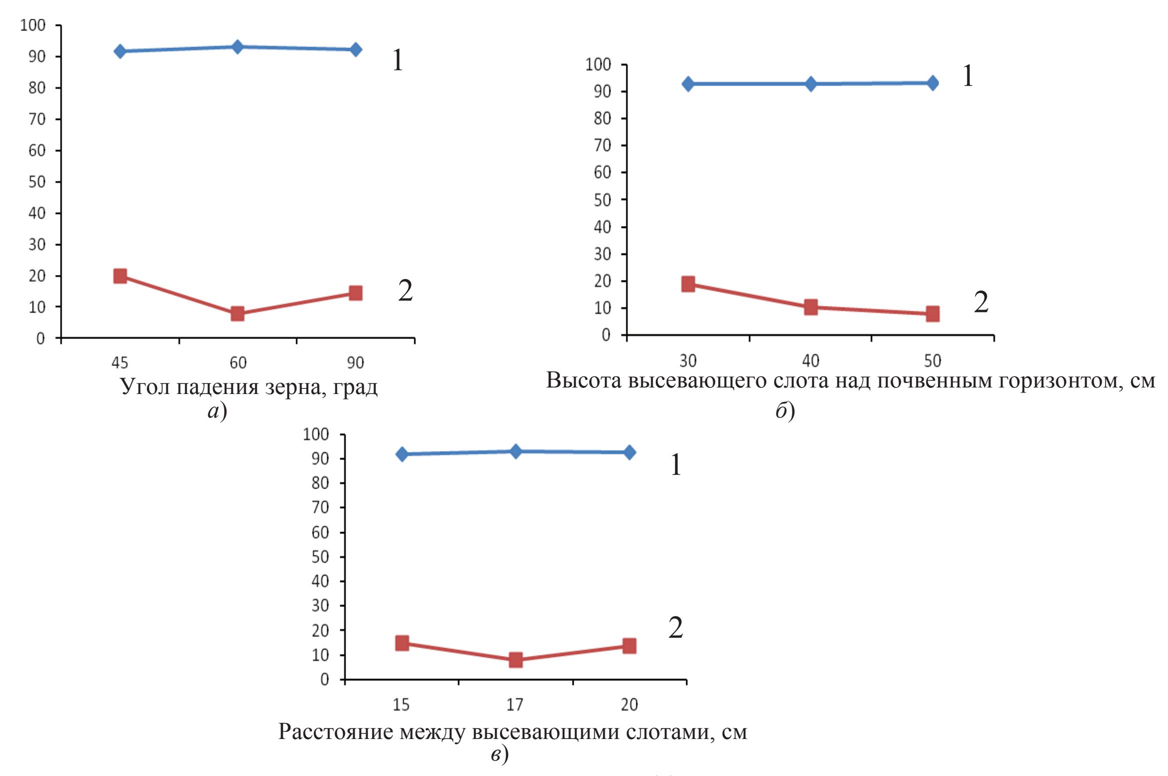


Рис. 4. Влияние на всхожесть угла падения зерна к почвенному горизонту (*а*), высоты высевающего слота над почвенным горизонтом (*б*) и расстояния между высевающими слотами (*в*): 1 — всхожесть (данные в процентах указаны по вертикальной оси), 2 — стандартное отклонение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что рассматриваемый параметр не оказывает существенного влияния на скорость прорастания зерен, однако распространение зерна в почве зависит от него весьма существенно, особенно, если угол составляет 60^0. Данный факт объясняется тем, что расположенные рядом слоты перекрывают потоки зерен во время их падения в почву. В зонах перекрытия количество высеянного зерна оказывалось больше. В итоге более равномерное распределение зерна на единицу площади позволило повысить урожайность, что весьма актуально для северных районов САР.

7. Высота падения зерна (рис. 3, *б*). В ходе эксперимента высевающий слот устанавливался на расстоянии 30, 40 и 50 см над почвой. Изыскания проводились при следующих условиях: скорость хода сеялки — 8 км/ч; подача посевного материала — 180 кг/га; расстояние между корпусами рабочих органов — 50 см; высота слота от почвы — 50 см; глубина обработки почвы — 15 см; угол падения зерна с почвенным горизонтом — 60^0; рабочие органы — жесткие стойки с закрепленными на них крыльчатыми лапами; расстояние между высевающими слотами — 17 см.

Эксперименты показали, что высота слота не оказывает особого влияния на процент всхожести, тогда как на равномерность распределения зерна в почве зависит от этого параметра весьма существенно. Это объясняется перекрытием потоков зерен во время их падения в почву, что заметно улучшает их распределение на единицу площади. Также отмечалось, что в зонах перекрытия количество высеянного зерна увеличивается.

8. Расстояние между высевающими слотами (рис. 4, *в*). Между высевающими слотами устанавливалось расстояние 15, 17 и 20 см. Эксперименты проходили при следующих условиях: скорость хода сеялки — 8 км/ч; глубина обработки почвы — 15 см; подача посевного материала — 180 кг/га; рабочие органы — жесткие стойки с закрепленными на них крыльчатыми лапами; расстояние между корпусами рабочих органов — 50 см; высота слота от почвы — 50 см; угол падения зерна с почвенным горизонтом — 60^0.

Проведенное исследование позволило установить, что расстояние между слотами не оказывает ощутимого влияния на процент всхожести, но является важным фактором для улучшения распространения зерен. Особенно заметный эффект был отмечен, когда расстояние между слотами составляло 17 см. Это объясняется перекрытием потоков зерен во время их падения в почву, что заметно улучшает их распределение на единицу площади. В зонах перекрытия количество высеянного зерна увеличивается.

Полевые испытания. Проведенные эксперименты позволили выявить оптимальные параметры и режимы работы сеялки. На основе полученных данных была разработана и изготовлена новая конструкция сеялки, испытанная в полевых условиях. Результаты работы двух видов оборудования сравнивались и были проанализированы.

Изыскания проводились на глиноземе, содержащем остатки прошлого урожая и пожнивные остатки. Две сравниваемые сеялки высевали одинаковое количество зерна и работали на скорости 8 км/ч.

Исследования показали, что при использовании модернизированной сеялки всхожесть увеличивается на 15 % (по сравнению с традиционно используемыми сеялками). Кроме того, существенно улучшилась равномерность распределения зерен в почве.

При проведении полевых работ в рамках данного исследования использование модифицированной сеялки позволило сократить временные затраты на 60 %. Оборудование традиционной конструкции на высев такого же объема посевного материала затрачивало значительно больше времени. Это было связано с экструзией почвы — как следствие, высевающие отверстия слотов забивались почвой, что требовало довольно длительных остановок для очистки рабочих органов и слотов. Кроме того, рабочее время уходило на то, чтобы объехать образовавшиеся груды почвы, сформированные рабочими органами.

Выводы.

1. Сеялка традиционной конструкции недостаточно эффективна, особенно на тяжелых по механическому составу почвах, с остатками корней от возделанных ранее культур и пожнивными остатками.

2. При использовании модифицированной конструкции всхожесть зерна достигла 93 % (соответствующий показатель для традиционной сеялки — 78 %). Улучшилась равномерность распределения проросшего посевного материала. Урожайность выросла до 86,7 % (соответствующий показатель для традиционной сеялки — 73 %).

3. Проведенные эксперименты позволили уточнить некоторые параметры работы модернизированной сеялки, обеспечивающие максимальную эффективность:

— расстояние между корпусом рабочего органа и высевающим слотом — 50 см;
— глубина обработки почвы — 15 см;
— расстояние между корпусами почвообрабатывающих рабочих органов — 50 см;
— угол падения зерен из высевающих слотов к почвенному горизонту — 60^0;
— высота падения зерен из слота до поверхности почвы — 50 см;
— расстояние между высевающими отверстиями расположенных рядом слотов — 17 см;
— скорость движения сеялки — 8 км/ч.

4. Для достижения наилучших результатов в качестве почвообрабатывающих орудий следует использовать стойки с крыльчатыми лапами.

5. Представленная конструкция сеялки в дальнейшем может быть усовершенствована и рекомендована для использования на других типах почв, для выращивания иных культур.

Библиографический список

1. Nachit, M. M. Economic and nutritional importance of cereals and food legumes in the Near East and North Africa / M. M. Nachit // Rachis. — 1982. — № 1. — P. 13–15.

2. Дьяченко, Г. Н. Интенсификация рабочих процессов при безотвальной обработке : дис … д-ра техн. наук / Г. Н. Дьяченко. — Ростов-на-Дону, 1990. — 446 с.

3. Alshzele Mahmoud Abed Alrahman. Influence of different farming methods to produce lentils / Alshzele Mahmoud Abed Alrahman // Egyptian Journal of A gricultural Engineering. — 1987. — № 4 (2). — P. 112–122.

4. Халянский, В. М. Сельскохозяйственные машины / В. М. Халянский, И. В. Горбачев. — Москва : Колос С, 2006. — 624 с.

5. Игнатенко, И. В. Машины для возделывания сельскохозяйственных культур / И. В. Игнатенко, Ю. И. Ермольев. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2008. — 374 с.

6. Syhel, B. Agricultural machinery / B. Syhel // Aleppo University Publications. — 2008. — 658 p.

7. Tarabeshe, Z. Field crops production / Z. Tarabeshe, K. Ahmad // Aleppo University Publications. — 2005. — 303 p.

8. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н. И. Кленин, В. Г. Егоров. — Москва : Колос С, 2005. — 464 с.

9. Шеин, Е. В. Курс физики почв / Е. В. Шеин. — Москва : Издательство Московского ун-та, 2005. — 432 с.

10. Albarre, A.-M. Comparing of agricultural mechanization systems for wheat production in desert areas / A.-M. Albarre // Egyptian Journal of Agricultural Engineering. — 1990. — №7 (1). — P. 40–46.

References

1. Nachit, M. M. Economic and nutritional importance of cereals and food legumes in the Near East and North Africa. Rachis, 1982, no. 1, pp. 13–15.

2. Dyachenko, G.N. Intensifikatsiya rabochikh protsessov pri bezotval'noy obrabotke : dis … d-ra tekhn. nauk. [Intensification of work processes in the subsurface treatment: Dr.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 1990, 446 p. (in Russian).

3. Alshzele Mahmoud Abed Alrahman. Influence of different farming methods to produce lentils. Egyptian Journal of Agricultural Engineering, 1987, no. 4 (2), pp. 112–122.

4. Khalyanskiy, V. M, Gorbachev, I.V. Sel'skokhozyaystvennye mashiny. [Agricultural machinery.] Moscow: Kolos S, 2006, 624 p. (in Russian).

5. Ignatenko, I.V., Yermolyev, Y.I. Mashiny dlya vozdelyvaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. [Machines for cropping.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2008, 374 p. (in Russian).

6. Syhel, B. Agricultural machinery. Aleppo University Publications, 2008, 658 p.

7. Tarabeshe, Z., K. Ahmad Field crops production. Aleppo University Publications, 2005, 303 p.

8. Klenin, N.I., Yegorov, V.G. Sel'skokhozyaystvennye i meliorativnye mashiny. [Agricultural and reclamation machinery.] Moscow: Kolos S, 2005, 464 p. (in Russian).

9. Shein, E.V. Kurs fiziki pochv. [Soil Physics Course.] Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo un-ta, 2005, 432 p. (in Russian).

10. Albarre, A.-M. Comparing of agricultural mechanization systems for wheat production in desert areas. Egyptian Journal of Agricultural Engineering, 1990, no. 7 (1), pp. 40–46.

Поступила в редакцию 02.03.2015
Сдана в редакцию 03.03.2015
Запланирована в номер 30.06.2015



УДК 581.1 DOI 10.12737/12598

Расчет подъема воды в криволинейных капиллярах по углу наклона касательной к мениску*

И. А. Кипнис[1], Ю. М. Вернигоров[2]**

[1]ООО «Научно-производственная фирма “КАСИОР”», г. Москва, Российская Федерация
[2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Calculation of water rise in curvilinear capillaries by tangent angle to the meniscus***

I. A. Kipnis[1], Y. M. Vernigorov[2]**

[1]“KASIOR” Research and Production Company LLC, Moscow, Russian Federation
[2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целями данной работы являются моделирование распределения воды в многоуровневых симметричных капиллярных системах с криволинейными капиллярами, а также расчет подъема воды в криволинейных капиллярах по углу наклона к горизонтали касательной к мениску воды в капилляре. Для полного описания продвижения воды в криволинейных ветвях разных уровней определены координаты менисков воды в этих уровнях относительно осей *y* и *x*, связанных, соответственно, с осью вертикального капилляра и поверхностью воды. При прочих равных условиях величина продвижения воды в криволинейных капиллярах всегда больше, чем в прямолинейных. Полученные результаты полезны при изучении проводимости сосудов ксилемы и продвижения почвенной влаги в структурах растения, что напрямую связано с подъемом и распределением воды в ксилеме. Показано, что по мере увеличения количества уровней угол наклона касательной к менискам воды в криволинейных ветвях уменьшается по сравнению с первой криволинейной ветвью. Уменьшение этого угла показывает, что вода в криволинейных ветвях продвигается тем меньше, чем больше номер уровня.

Ключевые слова: многоуровневый криволинейный капилляр, ветвь, ксилема, транспирация, растение, модель.

The work objectives are the simulation of the water distribution in the symmetric multilevel capillary systems with curvilinear capillaries, and the calculation of water rise in the curvilinear capillaries by the angle of inclination to the horizontal tangent to the water meniscus in the capillary. For a complete description of the water advance in the curvilinear branches of different levels, the coordinates of the water menisci in those levels about the axes y and x related respectively to the vertical capillary axis and the water surface are determined. Ceteris paribus, the value of water movement in the curvilinear capillaries is always greater than in the straight ones. The results obtained are useful in studying the conductivity of xylem vessels and the promotion of soil moisture in the plant structures which is directly related to the rising and distribution of water in the xylem. It is shown that with increase of the number of levels, the tangent angle to the water menisci in the curvilinear branches is reduced in comparison with the first curvilinear branch. The reduction of this angle indicates that the water in the curvilinear branches is moving the less, the higher the level number is.

Keywords: multilevel curvilinear capillary, branch, xylem, transpiration, plant, model.

Введение. Поступление и продвижение почвенной влаги в растении изучается не менее 200 лет. Результаты исследований изложены в монографиях по физиологии растений — например, [1, 2]. Но интерес к продолжению изысканий в этой области не ослабевает. Так, при изучении проводимости сосудов ксилемы экспериментально установлено, что диаметр и проводимость сосудов первичной и вторичной ксилем связаны с количеством почвенной влаги [3, 4]. В [5] рассматривается роль древесных структур как хранилищ воды. Данный вопрос напрямую связан с ее подъемом и распределением в ксилеме. В работах [6, 7] нами исследованы модели продвижения воды в ветвящихся многоуровневых

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: ikipnis@yandex.ru, jvernigorov@dstu.edu.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

прямолинейных капиллярных системах. Показано, что распределение воды в наклонных ветвях подчиняется общему правилу: в ветвях самого нижнего уровня вода продвигается дальше, чем в ветвях уровней, расположенных выше. При этом вода в вертикальном капилляре поднимется тем выше, чем больше боковых ветвей в капиллярной системе. Авторами [7] рассмотрены модели продвижения воды в капиллярных системах древесных стволов с учетом возможности ее горизонтального перемещения в сосудах ксилемы. Получено соотношение площадей капилляров по высоте ствола, обеспечивающее подъем воды в сосудах ксилемы. Выявлены соотношения для определения продвижения воды в криволинейных капиллярах, описываемых различными математическими функциями. В частности, рассмотрены ветви, вид которых описывается степенными и показательными функциями. Распределение воды в таких криволинейных ветвях и вертикальном капилляре аналогично полученному в [6]. Отличие состоит в том, что при прочих равных условиях объем воды в криволинейных капиллярах всегда больше, чем в прямолинейных. Авторы [8] с помощью фазово-контрастной рентгеновской томографии изучили механизм движения воды в сосудах растения и положение водного мениска в эмболированных газом сосудах.

Однако до настоящего времени не описана методика, позволяющая рассчитывать распределение воды в многоуровневых капиллярных системах с криволинейными капиллярами (каковыми являются реальные растения [9]) и определять положение в них водного мениска.

Цели работы:

— моделирование распределения воды в многоуровневых симметричных капиллярных системах с криволинейными капиллярами;

— расчет подъема воды в криволинейных капиллярах по углу наклона к горизонтали касательной к мениску воды в капилляре;

— определение координат менисков воды в капиллярах различных уровней.

Основная часть. Рассмотрим продвижение воды в капиллярной системе, имеющей криволинейные ветви второго яруса (рис. 1), которые, как и ветви первого уровня, описываются уравнением $f(x) = h = k\,x^n$.

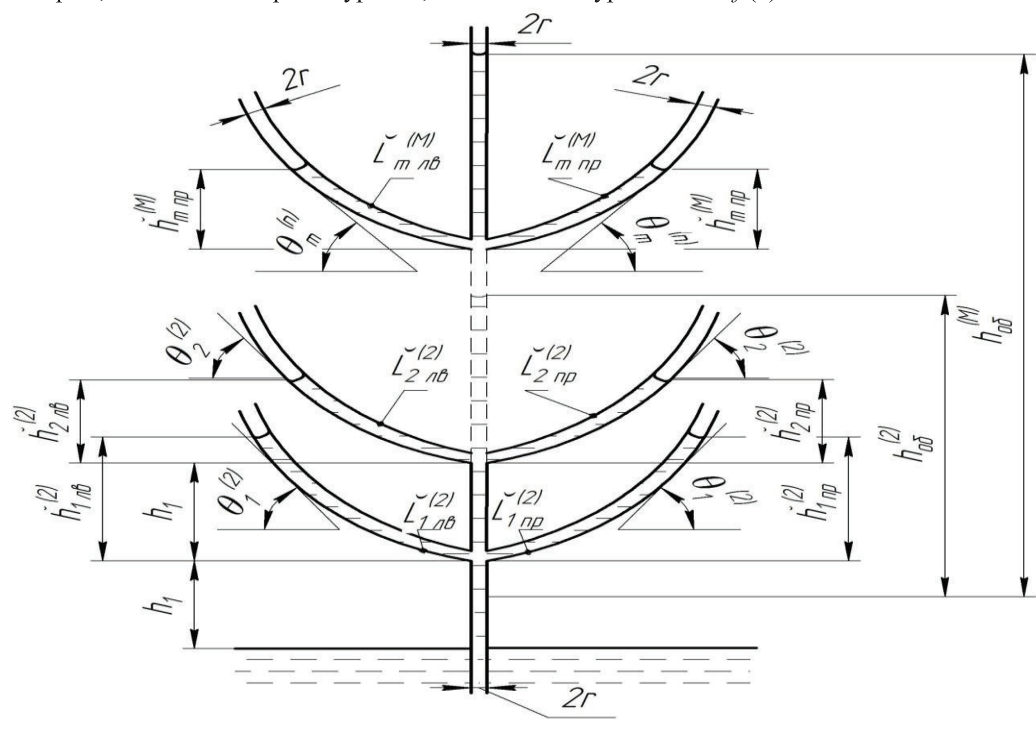


Рис. 1. Многоуровневый криволинейный капилляр

Для простоты положим, что радиусы всех капилляров равны r, расстояние между ветвями первого и второго яруса равно h_1.

Примем следующие обозначения для величин L, h и θ:

— верхний индекс показывает общее количество уровней боковых ветвей в рассматриваемой модели;

— нижний индекс показывает номер уровня, к которому относится рассматриваемая величина;

— дуга над L, h показывает, что рассматриваемая величина относится к криволинейной капиллярной системе.

В нижней части вертикального капилляра между поверхностью воды и боковыми криволинейными ветвями первого уровня (высота h_1) на воду действуют пять одинаковых сил поверхностного натяжения в менисках двухуровневой системы.

Силы поверхностного натяжения в криволинейных капиллярах второго уровня одновременно воздействуют:
— на часть воды вертикального капилляра (пропорционально одной пятой высоты h_1);
— на отрезок вертикальной части капилляра высотой h_1 между первым и вторым уровнями (пропорционально одной трети h_1).

Таким образом, уравнение $y(x) = h_1 + k x^n$ для ветвей второго уровня может быть записано в виде

$$f(x) = h = \frac{1}{3}h_1 + \frac{1}{5}h_1 + k x^n,$$

откуда $f^*(x) = tg\,\theta$, и, учитывая, что $x = \sqrt[n]{\frac{h - \left(\frac{1}{3}+\frac{1}{5}\right)h_1}{k}}$, получим

$$\theta_{(2)}^{(2)} = arctg\left[k\,n\left(\sqrt[n]{\frac{h - (\frac{1}{3}+\frac{1}{5})h_1}{k}}\right)^{n-1}\right].$$

Приведенные соотношения позволяют сделать следующий вывод. В криволинейных капиллярах в ветвях второго уровня вода продвигается так же, как если бы в системе был только один уровень — то есть два криволинейных капилляра, симметрично расположенных в одном уровне относительно вертикального. Это верно при условии, что сила поверхностного натяжения в этом капилляре поднимает объем воды, пропорциональный не высоте h_1, а высоте $(\frac{1}{3}+\frac{1}{5})h_1$, что приводит к изменению угла наклона касательной к мениску.

Используя эти рассуждения, можно записать уравнения для продвижения воды в каждой из капиллярных ветвей двухуровневой системы.

Для ветвей первого уровня:

$$\theta_1^{(2)} = arctg\left[kn\left(\sqrt[n]{\frac{h - \frac{1}{5}h_1}{k}}\right)^{n-1}\right], \quad (1)$$

$$\frac{1}{5}\pi r^2\rho g\, h_1 + \pi r^2\rho g\, \breve{L}_{1(\text{пр})}^{(1)}(x) = 2\,\pi r\sigma\, cos\,\alpha, \quad (2)$$

$$\frac{1}{5}\pi r^2\rho g\, h_1 + \pi r^2\rho g\, \breve{L}_{1(\text{лв})}^{(1)}(x) = 2\,\pi r\sigma\, cos\,\alpha. \quad (3)$$

Для ветвей второго уровня:

$$\theta_2^{(2)} = arctg\left[k\,n\left(\sqrt[n]{\frac{h - \left(\frac{1}{3}+\frac{1}{5}\right)h_1}{k}}\right)^{n-1}\right], \quad (4)$$

$$\frac{1}{5}\pi r^2\rho g\, h_1 + \frac{1}{3}\pi r^2\rho g\, h_1 + \pi r^2\rho g\, \breve{L}_{2(\text{пр})}^{(2)}(x) = 2\,\pi r\sigma\, cos\,\alpha, \quad (5)$$

$$\frac{1}{5}\pi r^2\rho g\, h_1 + \frac{1}{3}\pi r^2\rho g\, h_1 + \pi r^2\rho g\, \breve{L}_{2(\text{лв})}^{(2)}(x) = 2\,\pi r\sigma\, cos\,\alpha. \quad (6)$$

Для вертикального капилляра:

$$\pi r^2\rho g\left(\breve{h}_{2\text{об}}^{(2)} - 2h_1\right) + \frac{1}{3}\pi r^2\rho g\, h_1 + \frac{1}{5}\pi r^2\rho g\, h_1 = 2\,\pi r\sigma\, cos\,\alpha. \quad (7)$$

Приведем решения уравнений (2), (3), (5)–(7) относительно величин продвижения воды в капиллярах и в вертикальной ветви.

Для ветвей первого уровня:

$$\breve{L}_{1(\text{пр})}^{(2)} = \breve{L}_{1(\text{лв})}^{(2)} = (h - \frac{1}{5}h_1)/(1 - cos\, arctg\left[kn\left(\sqrt[n]{\frac{h - \frac{1}{5}h_1}{k}}\right)^{n-1}\right]). \quad (8)$$

Для ветвей второго уровня:

$$\breve{L}_{2(\text{пр})}^{(2)} = \breve{L}_{2(\text{лв})}^{(2)} = (h - (\frac{1}{3} - \frac{1}{5})\,h_1)/(1 - cos\, arctg\left[kn\left(\sqrt[n]{\frac{h - (\frac{1}{3}+\frac{1}{5})h_1}{k}}\right)^{n-1}\right]). \quad (9)$$

Для вертикальной ветви:

$$\breve{h}_{2\text{об}}^{(2)} = h + (2 - \frac{1}{3} - \frac{1}{5})\,h_1. \quad (10)$$

Из соотношений (8)–(10) видно, что наличие капилляров второго уровня обусловливает увеличение высоты подъема воды в вертикальной части и увеличение продвижения воды в капиллярах первого уровня. Действительно, определяя из (8) и (9) высоты подъема воды и составляя их разность, получим

$$\breve{h}_{1(\text{пр})(\text{лв})}^{(1)} - \breve{h}_{1(\text{пр})(\text{лв})}^{(2)} = (h - \frac{1}{5}h_1) - (h - (\frac{1}{3}+\frac{1}{5})\,h_1) = \frac{1}{3}h_1, \quad (11),$$

т. е. увеличивается высота подъема воды в нижнем капилляре, а следовательно, и значения ее продвижения $\breve{L}^{(1)}_{1(\text{пр})}$ и $\breve{L}^{(1)}_{1(\text{лв})}$ в ветвях нижнего уровня. Об этом также свидетельствует изменение угла наклона касательных к мениску воды в капиллярах первого и второго уровней.

Следуя представленной выше логике рассуждений и вводя соответствующие обозначения для ветвей, например, 5-го уровня, предположим, что расстояние между всеми уровнями равно h_1. Таким образом получим следующие соотношения:

$$\theta^{(5)}_1 = arctg\ [k\ n\ (\sqrt[n]{\frac{h - \frac{1}{11} h_1}{k}})^{n-1}], \tag{12}$$

$$\theta^{(5)}_2 = arctg[kn(\sqrt[n]{\frac{h - \left(\frac{1}{9} + \frac{1}{11}\right) h_1}{k}})^{n-1}], \tag{13}$$

$$\theta^{(5)}_3 = arctg[kn\ (\sqrt[n]{\frac{h - \left(\frac{1}{7} + \frac{1}{9} + \frac{1}{11}\right) h_1}{k}})^{n-1}], \tag{14}$$

$$\theta^{(5)}_4 = arctg[kn\ (\sqrt[n]{\frac{h - \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{7} + \frac{1}{9} + \frac{1}{11}\right) h_1}{k}})^{n-1}], \tag{15}$$

$$\theta^{(5)}_5 = arctg[kn\ (\sqrt[n]{\frac{h - \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \frac{1}{7} + \frac{1}{9} + \frac{1}{11}\right) h_1}{k}})^{n-1}]. \tag{16}$$

Если в системе M уровней, то

$$\theta^{(\text{M})}_m = arctg\ [k\ n\ (\sqrt[n]{\frac{h - h_1 \sum^{m}_{(M)} \frac{1}{2m+1}}{k}})^{n-1}], \tag{17}$$

где M — количество уровней в капиллярной системе; m — номер рассматриваемого уровня.

Отсчет уровней в (17) следует вести сверху вниз.

Соотношения для величины продвижения воды в криволинейных капиллярах и высоты ее подъема в вертикальной ветви для пятиуровневой системы принимают следующий вид:

$$\breve{L}^{(5)}_{1(\text{пр})} = \breve{L}^{(5)}_{1(\text{лв})} = (h - \frac{1}{11} h_1)/(1 - cos\ arctg[kn\ (\sqrt[n]{\frac{h - \frac{1}{11} h_1}{k}})^{n-1}]), \tag{18}$$

$$\breve{L}^{(5)}_{2(\text{пр})} = \breve{L}^{(5)}_{2(\text{лв})} = (h - (\frac{1}{9} + \frac{1}{11})\ h_1)/(1 - cos\ arctg[kn(\sqrt[n]{\frac{h - \left(\frac{1}{9} + \frac{1}{11}\right) h_1}{k}})^{n-1}]), \tag{19}$$

$$\breve{L}^{(5)}_{3(\text{пр})} = \breve{L}^{(5)}_{3(\text{лв})} = (h - (\frac{1}{7} + \frac{1}{9} + \frac{1}{11})\ h_1)/(1 - cosarctg[kn(\sqrt[n]{\frac{h - \left(\frac{1}{7} + \frac{1}{9} + \frac{1}{11}\right) h_1}{k}})^{n-1}]), \tag{20}$$

$$\breve{L}^{(5)}_{4(\text{пр})} = \breve{L}^{(5)}_{4(\text{лв})} = (h - (\frac{1}{5} + \frac{1}{7} + \frac{1}{9} + \frac{1}{11})\ h_1)/(1 - cosarctg[kn(\sqrt[n]{\frac{h - (\frac{1}{5} + \frac{1}{7} + \frac{1}{9} + \frac{1}{11}) h1}{k}})^{n-1}]), \tag{21}$$

$$\breve{L}^{(5)}_{5(\text{пр})} = \breve{L}^{(5)}_{5(\text{лв})} = (h - (\frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \frac{1}{7} + \frac{1}{9} + \frac{1}{11}) h_1)/(1 - cosarctg[kn(\sqrt[n]{\frac{h - (\frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \frac{1}{7} + \frac{1}{9} + \frac{1}{11}) h1}{k}})^{n-1}]), \tag{22}$$

$$\breve{h}^{(5)}_{5\text{об}} = h + (5 - \frac{1}{3} - \frac{1}{5} - \frac{1}{7} - \frac{1}{9} - \frac{1}{11})\ h_1. \tag{23}$$

Общие выражения для криволинейной капиллярной системы из M уровней могут быть записаны в виде:

$$\breve{L}^{(M)}_{m(\text{пр/лв})} = (h - h_1 \sum^{m}_{(M)} \frac{1}{2m+1})/(1 - cos\ arctg\ [kn(\sqrt[n]{\frac{h - h1 \sum^{m}_{(M)} \frac{1}{2m+1}}{k}})^{n-1}]), \tag{24}$$

$$\breve{h}^{(M)}_{m\text{об}} = h + (M)\ h_1 - h_1 \sum^{m}_{(M)} \frac{1}{2m+1}. \tag{25}$$

Сравнивая величины продвижения воды в вертикальном капилляре и в криволинейных капиллярах разных уровней, полученные в уравнениях (11)–(25), можно отметить следующее:

— в криволинейных капиллярах по мере увеличения количества уровней величина продвижения воды в каждом более высоком уровне меньше, чем в капиллярах предыдущих уровней;

— наибольший угол наклона касательной к мениску имеет место в капилляре самого нижнего уровня, и этот угол уменьшается в каждом последующем уровне;

— высота подъема воды в вертикальном капилляре увеличивается по мере роста «этажности» капиллярной системы.

Для полного описания продвижения воды в криволинейных ветвях разных уровней необходимо определить координаты менисков воды в этих уровнях относительно осей y и x, связанных, соответственно, с осью вертикального капилляра и поверхностью воды. Для решения этой задачи необходимо найти уравнение касательной к мениску для функции, заданной выражением

$$y(x) = h_1 + k\,x^n.$$

Уравнение касательной к графику функции в общем виде [10]:

$$y = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0). \qquad (26)$$

Определим абсциссу x_0 в точке касания касательной мениска, считая угол наклона касательной θ к прямой $y = 0$ заданным.

Очевидно, что

$$f'(x_0) = tg\,\theta = k\,n\,x_0^{(n-1)}, \qquad (27)$$

откуда

$$x_0 = \sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta}{kn}}. \qquad (28)$$

Тогда

$$f(x_0) = h_1 + k\,\Big(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta}{kn}}\Big)^n, \qquad (29)$$

$$f'(x_0) = k\,n\,\Big(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta}{kn}}\Big)^{(n-1)}. \qquad (30)$$

С учетом M уровней ($1 \le m \le M$) капиллярной системы (см. (24) и (25)) уравнение касательной (26) может быть записано в виде

$$y = m\,h_1 + k\,\Big(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\Big)^n + kn\,\Big(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\Big)^{(n-1)}\Big(x - \sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\Big) =$$

$$m\,h1 + (1-n)\,k\,\Big(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\Big)^n + kn\,\Big(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\Big)^{(n-1)} x. \qquad (31)$$

Полагая $y = 0$, получим значение x в точке пересечения касательной оси абсцисс:

$$x_{|y=0} = -\Big(m\,h_1 + (1-n)\,k\,\Big(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\Big)^n\Big)\Big/\Big(kn\Big(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\Big)^{(n-1)}\Big). \qquad (32)$$

Вычитая из (28) (32) и умножая на $tg\,\theta^{(m)}$, получим значение величины ординаты y_0 водяного мениска в m-й ветви:

$$y_0 = (x_0 - x_{|y=0})\,tg\,\theta^{(m)} = \Big[\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}} + \Big(m\,h_1 + (1-n)k\Big(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\Big)^n\Big)\Big/$$

$$\Big/\Big(kn\,\Big(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\Big)^{(n-1)}\Big)\Big]\,tg\,\theta^{(m)}. \qquad (33)$$

Воспользовавшись выражением (17), можно получить соотношения для определения координат водного мениска:

$$x_0 = \sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\Big[k\,n\,\Big(\sqrt[n]{\frac{h - h1\,\sum_{(M)}^{m}\frac{1}{2m+1}}{k}}\Big)^{n-1}}{kn}}, \qquad (34)$$

$$y_0 = \Big[\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\Big[k\,n\,\Big(\sqrt[n]{\frac{h - h1\,\sum_{(M)}^{m}\frac{1}{2m+1}}{k}}\Big)^{n-1}\Big]}{kn}} + \Big(m\,h_1 + (1-n)\,k\,\Big(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\Big[k\,n\,\Big(\sqrt[n]{\frac{h - h1\,\sum_{(M)}^{m}\frac{1}{2m+1}}{k}}\Big)^{n-1}\Big]}{kn}}\Big)^n\Big)\Big/$$

$$\Big/\Big(kn\,\Big(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\Big[k\,n\,\Big(\sqrt[n]{\frac{h - h1\,\sum_{(M)}^{m}\frac{1}{2m+1}}{k}}\Big)^{n-1}\Big]}{kn}}\Big)^{(n-1)}\Big)\Big] \times tg\,\Big[kn\,\Big(\sqrt[n]{\frac{h - h1\,\sum_{(M)}^{m}\frac{1}{2m+1}}{k}}\Big)^{n-1}\Big]. \qquad (35)$$

Аналогично могут быть получены соотношения продвижения воды и координаты водных менисков в капиллярах, описываемых другими математическими функциями.

В таблице 1 представлены углы наклона касательной к мениску в градусах, определенные как величина арктангенсов для двух-, трех-, четырех- и пятиуровневых систем, вычисленные с точностью до 10’.

Таблица 1

Углы наклона касательной к менискам при изменении *M* от 2 до 5

№ уровня	k_1				
	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
Двухуровневая система					
1	63^{0}	62^{0}30’	62^{0}17’	61^{0}54’	61^{0}24’
2	62^{0}6’	60^{0}30’	59^{0}36’	58^{0}30’	56^{0}18’
Трехуровневая система					
1	63^{0}6’	62^{0}48’	62^{0}36’	62^{0}24’	62^{0}
2	62^{0}30’	61^{0}42’	61^{0}20’	60^{0}42’	59^{0}36’
3	61^{0}42’	59^{0}42’	58^{0}24’	57^{0}	53^{0}36’
Четырехуровневая система					
1	63^{0}12’	62^{0}54’	62^{0}48’	62^{0}36’	62^{0}18’
2	62^{0}48’	$62^{з}$12’	61^{0}48’	61^{0}30’	60^{0}42’
3	62^{0}18’	61^{0}6’	60^{0}24’	59^{0}36’	57^{0}54’
4	61^{0}24’	58^{0}48’	57^{0}18’	55^{0}24’	50^{0}30’
Пятиуровневая система					
1	63^{0}12’	63^{0}	62^{0}54’	62^{0}48’	62^{0}36’
2	62^{0}54’	62^{0}24’	62^{0}12’	61^{0}54’	61^{0}24’
3	62^{0}36’	61^{0}42’	61^{0}12’	60^{0}42’	59^{0}36’
4	62^{0}6’	60^{0}30’	59^{0}36’	58^{0}42’	56^{0}24’
5	61^{0}12’	58^{0}12’	56^{0}18’	54^{0}	47^{0}24’

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод, что при $k_1 = 0{,}2$ разница в величине углов для первого и второго уровней составляет 1 и 2^{0}, а при $k_1 = 0{,}6 – 3^{0}$ и 8^{0} — соответственно, для двух- и пятиуровневой систем. Кроме того, в двухуровневой системе при изменении k_1 от 0,2 до 0,8 величина угла изменяется для ветвей первого нижнего уровня на 2^{0}, а для ветвей второго уровня на 6^{0}. Для пятиуровневой системы при изменении k_1 в тех же пределах величина угла изменяется на 1^{0} для первого уровня и на 14^{0} — для пятого.

Выводы.

1. В капиллярных системах с криволинейными боковыми ветвями величина продвижения воды характеризуется углом наклона касательной к водному мениску в капиллярной ветви.

2. По мере увеличения количества уровней угол наклона касательной к менискам в криволинейных ветвях уменьшается по сравнению с первой криволинейной ветвью. Уменьшение этого угла показывает, что вода в криволинейных ветвях продвигается тем меньше, чем больше номер уровня.

Библиографический список

1. Кузнецов, В. В. Физиология растений / В. В. Кузнецов, Г. А. Дмитриева. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Высшая школа, 2006. — 742 с.

2. Taiz, L. Plan Physiology / L. Taiz, E. Zeiger — 3rd edition. — Sinauer Associates Inc., 2002. — 690 p.

3. Comparison of root anatomy and xylem vessel structure in rain-fed and supplementary irrigated «Yaghooti — Syah Shiraz» grapevine / H. Rajaei [et al.] // Horticulture, Environment and Biotechnology. — 2013. — Vol. 54, issue 4. — P. 297–302.

4. Gloser, V. Analysis of anatomical and functional traits of xylem in Humulus lupulus L. stems / V. Gloser [et al.] // Plant, Soil and Environment. — 2011. — 57 (7). — P. 338—343.

5. Hydraulic capacitance: Biophysics and Functional Significance of Internal Water Sources in Relation to Tree Size / F.-G. Scholz [et al] // Tee Physiology. — 2001. — Vol. 4. — P. 341–361.

6. Вернигоров, Ю. М. Математическое моделирование распределения жидкости в ветвящихся капиллярных системах / Ю. М. Вернигоров, И. А. Кипнис // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 8 (51). —С. 1195–1206.

7. Вернигоров, Ю. М. Капиллярная модель древесных стволов / Ю. М. Вернигоров, И. А. Кипнис // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 6 (67). — С. 24–40.

8. Кипнис, И. А. Математическая модель подъема воды в простых криволинейных капиллярах / И. А. Кипнис, Ю. М. Вернигоров // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 5/6 (74). — С. 110–118.

9. Lee, S-J. In vivo visualization of the water-refilling process in xylem vessels using X-ray micro-imaging / S-J. Lee, Y. Kim // Annals of Botany. — 2008. — Vol. 101. — P. 595–602.

10. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев // Санкт-Петербург : Лань, 2009. — 608 с.

References

1. Kuznetsov, V.V., Dmitriyeva, G.A. Fiziologiya rasteniy. [Plant Physiology.] 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Vysshaya shkola, 2006, 742 p. (in Russian).

2. Taiz, L., Zeiger, E. Plant Physiology, 3rd ed. Sinauer Associates Inc., 2002, 690 p.

3. Rajaei, H., et al. Comparison of root anatomy and xylem vessel structure in rain-fed and supplementary irrigated “Yaghooti — Syah Shiraz” grapevine. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2013, vol. 54, iss. 4, pp. 297-302.

4. Gloser, V., et al. Analysis of anatomical and functional traits of xylem in Humulus lupulus L. stems. Plant, Soil and Environment, 2011, no. 57 (7), pp. 338-343.

5. Scholz, F.-G., et al. Hydraulic capacitance: Biophysics and Functional Significance of Internal Water Sources in Relation to Tree Size. Tee Physiology, 2001, vol. 4, pp. 341–361.

6. Vernigorov, Y.M., Kipnis, I.A. Matematicheskoe modelirovanie raspredeleniya zhidkosti v vetvyashchikhsya kapillyarnykh sistemakh. [Mathematical modeling of liquid distribution in branch capillary systems.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 8 (51), pp. 1195 – 1206 (in Russian).

7. Vernigorov Y.M., Kipnis, I.A. Kapillyarnaya model' drevesnykh stvolov. [Capillary model of tree trunks.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 6 (67), pp. 24 – 40 (in Russian).

8. Kipnis, I.A., Vernigorov Y.M. Matematicheskaya model' pod"ema vody v prostykh krivolineynykh kapillyarakh. [Water rise mathematical model in simple curvilinear capillaries.] Vestnik of DSTU, 2013, no. 5/6 (74), pp. 110-118 (in Russian).

9. Lee, S.-J., Kim, Y. In vivo visualization of the water-refilling process in xylem vessels using X-ray micro-imaging. Annals of Botany, 2008, vol. 101, pp. 595-602.

10. Bronstein, I.N., Semendyaev, K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov. [Handbook on mathematics for engineers and students of higher educational institutions.] St. Petersburg: Lan', 2009, 608 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 16.02.2015
Сдана в редакцию 18.02.2015
Запланирована в номер 30.06.2015

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 62-7 DOI 10.12737/12604

Simulation of vibration and noise of belt gearing*

A.N. Chukarin[1], **M.A. Gapova**[2**]
[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2] Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russian Federation

Моделирование вибрации и шума ременных передач***

А.Н. Чукарин[1], **М.А. Гапова**[2**]
[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] Кабардино-Балкарский государственный университет, г. Нальчик, Российская Федерация

The aim of this work is to find the methods of reducing noise and vibration in the belt drive of the electromechanical drive of the selected technological equipment. Thus, we are having more comfortable working conditions in the workplace in compliance with the sanitary standards of noise and vibration.
The noise abatement techniques and the simulation of the vibration of the grinding woodworker flexible gearing are considered. Modeling was performed with the introduction of Euler variables. The simulated dependences allow by calculation determine noise levels and load characteristics of the selected equipment. The comparison between the expected noise levels and the sanitary standards allow determining the exceedance and the sources of its generation. All this is the basis for selecting the engineering solutions to observe the noise code.

Keywords: noise, vibration, belt gearing, noise reduction, noise levels.

Целью работы являлся поиск методов снижения уровня шума и вибрации ременной передачи в электромеханическом приводе выбранного технологического оборудования для создания более комфортных условий труда рабочего с соблюдением санитарных норм.
Рассматриваются способы снижения шума и моделирование вибрации передач с гибкой связью шлифовального деревообрабатывающего станка. Моделирование производилось при введении переменных Эйлера. Полученные зависимости позволяют расчетным путем определить уровни шума и нагрузочные характеристики выбранного оборудования. Сравнение ожидаемых уровней шума с санитарными нормами позволяет количественно определять превышения и образующие их источники, что является основой выбора инженерных решений по соблюдению санитарных норм.

Ключевые слова: шум, вибрация, ременные передачи, снижение шума, уровни шума.

Introduction: Transmissions with flexible connection, to which strap transmissions behave to, are becoming more and more common in the technological equipment. This is especially true to the high-speed and low-rate equipment; in particular, to grinding woodworking machine tools, tool-grinding and drilling machine tools that do not have a gear drive, and their spindles are rotated through the driving belts.

* The research is done within the frame of the independent R&D.
** E-mail: marina_agm@mail.ru
*** Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

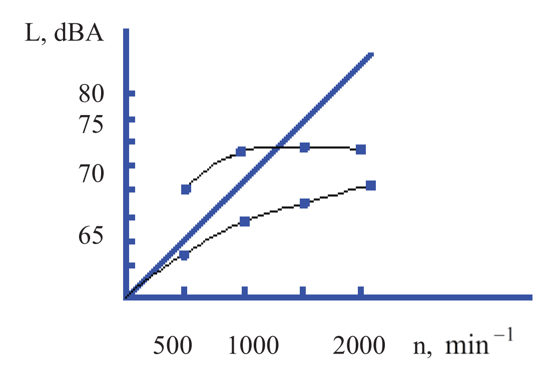


Fig. 1. The noise of belt drives at TM =22-45 N·m·s [1]: 1- belt gear;
2 - flat; 3 - belts wedge

The main part. In the established operating mode, the engine torque is balanced by the point of cutting forces. We will designate the appropriate voltage in branches: σ_{10} - in leading branch and σ_{10} - in driven. Lengthens of branches of the tape caused by additional voltage arising at oscillations of pulleys, are defined as:

$$\Delta l_1 = \Delta\sigma_1 \cdot \left(\frac{l}{E} - \frac{R_2}{\mu_0 E}(1 - l^{-\mu_0 \ 0}) \right) = \alpha_1 \Delta\sigma_1 \qquad (1)$$

$$\Delta l_2 = \Delta\sigma_2 \cdot \left(\frac{l}{E} - \frac{R_2}{\mu_0 E}(1 - l^{-\mu_0 \ 0}) \right) = \alpha_2 \Delta\sigma_2$$

where l is the distance between the axles of pulleys, m;
E is belt material spring constant, Pa; R_1 and R_2 are the radii of leading and driven pulleys, m; φ_0=150° is the angle of elastic slip of flexible communication on the pulley; μ_0= 0.3 is factor friction of flexible communication and pulley.
To the driven pulley, the periodic revolting moment of cutting forces ΔM = M0 sin (ωt) acts, where ω is circular rotational speed, rad/s.
Then the differential equations of the forced vibrations of pulleys look like in this case:

$$\varphi_1'' + \frac{R_1^2}{J1}\alpha_3\varphi_1 - \frac{R_1 R_2}{J_1}\alpha_3\varphi_2 = 0 \qquad (2)$$

$$\varphi_2'' + \frac{R_1 R_2}{J_2}\alpha_3\varphi_1 + \frac{R_2^2 F}{J_2}\alpha_3\varphi_2 = M_0 \cdot sin\omega t$$

where J_1 and J_2 are the moments of inertia of leading and driven pulleys, N·s^2·м;
F – is cross sectional area of the tape, $м^2$; f $\alpha_3 = (\alpha_1 + \alpha_2)/\alpha_1\alpha_2$
We search for the decision of this system of the equations as:

$$\varphi_1 = \varphi_{10} sin\omega t \qquad (3)$$

$$\varphi_2 = \varphi_{20} sin\omega t$$

From the system, we will get:

$$\varphi_{10} = \frac{\mu_0 R_1 R_2 F \alpha_3}{J_1 J_2 \left[\omega^2 - \left(\frac{R_1^2 F}{J_1} + \frac{R_2^2 F}{J_2} \right) \cdot \alpha_3 \right]} \qquad (4)$$

$$\varphi_{20} = \frac{\mu_0 - (\omega^2 - \frac{R_1^2 \alpha_3}{J_1})}{J_1 J_2 \omega^2 \left[\omega^2 - \left(\frac{R_1^2 F}{J_1} + \frac{R_2^2 F}{J_2} \right) \cdot \alpha_3 \right]}$$

The voltage change in the belt drive branches is connected with lengthening of the branches:

$$\Delta\sigma_{10} = \frac{R_1\varphi_{10} - R_2\varphi_{20}}{\alpha_1} \quad (5)$$

$$\Delta\sigma_{10} = \frac{R_2\varphi_{20} - R_1\varphi_{10}}{\alpha_2}$$

Then total voltage in the branches is defined as follows: $\sigma_1 = \sigma_{10} + \sigma_{10} sin\omega t$ and $\sigma_1 = \sigma_{10} + \sigma_{10} sin\omega t$.

To determine the vibration resistances of the belt drive branches as a moving flexible connection, we use the Euler variables. Going from total derivatives to local we will receive:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial t}\cdot\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial y}{\partial t} + \upsilon\frac{\partial y}{\partial z} \quad (6)$$

$$\frac{\delta^2 y}{\delta t^2} = \frac{\delta^2 y}{\delta t^2} + 2\upsilon\frac{\delta^2 y}{\delta z \delta t} + \upsilon^2\frac{\delta^2 y}{\delta t^2}$$

where υ is linear speed of the belt movement , m / s.

Then the well-known equation of oscillations of flexible connection to the case in question takes the form:

$$\frac{\delta^2 y}{\delta t^2} = 2\upsilon\frac{\delta^2 y}{\delta z\delta t} - \left(\frac{T}{m_0} - \upsilon^2\right)\frac{\delta^2 y}{\delta z^2} = 0 \quad (7)$$

where m_0- distributed weight, kg / m; T- tension,H.

Belt branches tension changes in time, so the equations of oscillations respectively for the leading and driven branches take the following form:

$$\frac{\delta^2 y}{\delta t^2} + 2\omega\frac{\delta^2 y}{\delta z\delta t} = \left(\frac{F\sigma_{10}}{m_0} + \frac{F\Delta\sigma_1}{m_0} sin\,\omega t - \upsilon^2\right)\frac{\delta^2 y}{\delta z^2} \quad (8)$$

$$\frac{\delta^2 y}{\delta t^2} + 2\omega\frac{\delta^2 y}{\delta z\delta t} = \left(\frac{F\sigma_{20}}{m_0} + \frac{F\Delta\sigma_2}{m_0} - sin\,\omega t - \upsilon^2\right)\frac{\delta^2 y}{\delta z^2}$$

From this system, speeds of oscillations on their own forms of oscillations are defined. On this base, considering the known dependences of the natural oscillation frequencies of the flexible coupling, an acoustic model of a linear source is accepted.

The applicability of this model is confirmed by the fact that the belt length is much larger than the cross-sectional area. The sound pressure level of the source based on the data is obtained in [3, 4] and is reduced to the following form:

for $\kappa_0 h_p > 1$

$$|p| = 0{,}03\frac{f_k b h_p b_p}{r} \quad (9)$$

for $\kappa_0 h_p > 1$

$$|p| = 43\frac{B f_k^{0.5}(h_p b_p)^{0.5}}{r} \quad (10)$$

where κ_0 is a wave number, 1 / m; h_p and b_p are the belt width and thickness (respectively) m; r is the distance from the belt to calculated point, m; B is the function defining the amplitude-phase distribution of the vibration velocity on the surface of the source and is given by:

$$B = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^l exp\left(-i k_0 z \cos\beta\right) d z \quad (11)$$

cos β is angle of radiation; f_k is natural oscillation frequencies of the belt, Hz, determined by the formula (5):

$$f_k = \frac{k}{2l}\sqrt{\left(\frac{\pi k}{l}\right)^2\frac{EJ}{m_0} + \frac{T_0}{m_0}} \quad (12)$$

http://vestnik.donstu.ru

l – length of the belt, m; κ – factor determining the natural frequency; E –spring constant, Pa; J – section moment of inertia. Using the representation of the elastic modulus in the complex form [19], we obtain an expression of the real part $R_e\{f_k\}$

$$f_k = \frac{k}{2l}\sqrt{\left(\frac{\pi k}{2l}\right)^2 \frac{EJ}{m_0} + \frac{T_0}{m_0}} + \sqrt{2cos}\,\eta/2 \tag{13}$$

where η - effective loss rate of oscillatory energy.

On this base, the dependences for determining the noise spectra of the belt drives are received

at $\kappa_0 h_p \leq 1$

at $\kappa_0 h_p > 1$

$$L = 20lg\frac{B}{r} + 5lg\,h_p b_p + 10lg\,R_e\{f_k\} + 10lg\,K + 127 \tag{14}$$

where K – number of belts.

The obtained dependences allow by calculation to determine the sound pressure levels of the belt transmission taking into account the geometrical loaded parameters, and, most significantly, the loss factors of the oscillatory energy.

The acoustic system of the belt drives represents a set of three sources - two pulleys and directly flexible coupling, i.e. the belt branches themselves. These subsystems have different inflexibility and, consequently, vary in the frequency behavior. Therefore, for the identification of the sources and verification of the radiator model, the natural oscillation frequencies should be determined according to the design model (fig. 2).

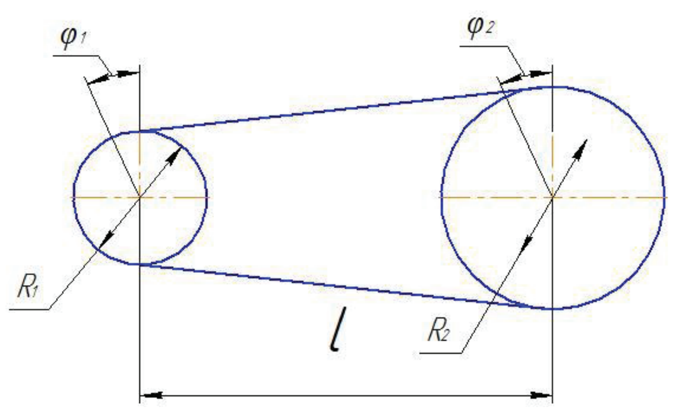


Fig. 2. Design model of belt drive

At oscillation of pulleys, the upper and lower transmission branches elongate.

By designating Δl_1 and Δl_2, we receive complementary elongation of the upper and lower branches

$$\Delta l_1 = R_1\varphi_1 - R_2\varphi_2 = a_1\Delta\sigma_1 \tag{15}$$

$$\Delta l_2 = -R_1\varphi_1 + R_2\varphi_2 = a_2\Delta\sigma_2$$

In case of oscillations, both the inertia moment and the tension moment in the belt drive branches affect each of the pulleys.

Then, the differential equations of the natural oscillations of pulleys look like:

$$\ddot{\varphi}_1 + \frac{R_1^2 F a_3}{J_1}\varphi_1 - \frac{R_1 R_2 F a_3}{J_1}\varphi_2 = 0$$

$$\ddot{\varphi}_2 + \frac{R_1 R_2 F a_3}{J_2}\varphi_1 - \frac{R_2^2 F a_3}{J_2}\varphi_2 = 0 \tag{16}$$

where $a_3 = \frac{a_1 + a_2}{a_1 a_2}$.

From the system of the equations (16), the natural oscillation frequencies are defined:

$$f_1 = 0;\ f_2 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{R_1 F a_3\left(\frac{R_1}{J_1} + \frac{R_2}{J_2}\right)} \tag{17}$$

Conclusions:

The research results have shown that the sound radiation of the pulleys has a narrow-band spectrum, and natural frequencies lie in a low-frequency range. The belt drive as a system with the distributed mass has a broadband spectrum of natural oscillation frequencies.

According to the obtained dependences, the growth of the factors of the oscillatory energy loss results in a significant reduction in the vibroacoustic characteristics of both the belt transmissions and the whole spindle unit.

References

1. Kozochkin, M.P. Metody snizheniya shuma metallorezhushchikh stankov i ikh uzlov: Metod. rekomendatsii. [Methods to reduce the noise of machine tools and their components: Method. instructions.] Moscow, 1986, 68 p. (in Russian).
2. McGuinn, J., senior ed. Chiming in on Gear Noise: Three Experts Have Their Say. Gear Technology, 2011, vol. 28, no.5, pp. 23-29.
3. Yudin, E.Y., ed. Bor'ba s shumom na proizvodstve: Spravochnik. [Noise control in production: handbook.] Moscow: Mashinostroenie, 1985, 400 p. (in Russian).
4. Rao, S.S. Mechanical Vibrations**.** 3rd ed. Addison-Wesley Publ. Co., 1995, 356 p.
5. Stephen, N.G. On energy harvesting from ambient vibration. Journal of Sound and Vibration, 2006, vol. 293, no. 1-2, pp. 409–425.
6. Volkov, L.K., et al. Vibratsii i shum elektricheskikh mashin maloy moshchnosti. [Vibration and noise of electric low-power machines.] / L.K. Volkov [et al.] // Leningrad: Energiya, 1979, 205 p. (in Russian).
7. Chukarin, A.N. Teoriya i metody rascheta i proektirovaniya tekhnologicheskikh mashin dlya mekhanicheskoy obrabotki. [Theory and methods of calculation and design of technological machines for machining.] Rostov-on- Don: DSTU Publ. Centre, 2005, 152 p. (in Russian).
8. Ivanov, N.I., Nikiforov, A.S. Osnovy vibroakustiki. [Vibroacoustics Basics.] SPb.: Politekhnika, 2000, 482 p. (in Russian).
9. Chukarin, A.N., Shamshura, S.A. Sovershenstvovanie metodov rascheta vibroakusticheskikh kharakteristik protsessa vibroudarnogo uprochneniya detaley na odnokoordinatnykh stankakh s tsel'yu obespecheniya promyshlennoy bezopasnosti oborudovaniya. [Methods improvement of vibroacoustic characteristics calculation in the process of shock-vibrating work hardening on single-axis machines to ensure industrial safety of the equipment.] Rostov-on- Don: DSTU Publ. Centre, 2007, 108 p. (in Russian).
10. Chukarin, A.N. Teoriya i metody akusticheskikh raschetov i proektirovaniya tekhnologicheskikh mashin dlya mekhanicheskoy obrabotki. [Theory and methods of acoustic calculation and design of technology machines for mechanical restoration.] Rostov-on- Don: DSTU Publ. Centre, 2004, 152 p. (in Russian).

Библиографический список

1. Козочкин, М. П. Методы снижения шума металлорежущих станков и их узлов: Метод. рекомендации. / М. П. Козочкин // — Москва, 1986. — 68 с.
2. McGuinn, J., senior ed. Chiming in on Gear Noise: Three Experts Have Their Say. / McGuinn J., Senior Ed. // Gear Technology, 2011, vol. 28, no.5, pp. 23-29.
3. Борьба с шумом на производстве: Справочник / Под ред. Е. Я. Юдина. — Москва : Машиностроение, 1985. — 400 с.
4. Rao, S. S. Mechanical Vibrations**.** (3rd ed.) / S. S. Rao // Addison - Wesley Publ. Co., 1995. — 356 p.
5. Stephen, N. G. On energy harvesting from ambient vibration. / N. G. Stephen // Journal of Sound and Vibration, 2006, vol. 293, no. 1–2, pp. 409–425.
6. Волков, Л. К. Вибрации и шум электрических машин малой мощности / Л. К. Волков, Ковалев, Г. Н. Никифорова и др. — Ленинград : Энергия, 1979. — 205 с.
7. Чукарин, А. Н. Теория и методы расчета и проектирования технологических машин для механической обработки. / А. Н. Чукарин // Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2005 — 152 с.
8. Иванов, Н. И. Основы виброакустики. / Н. И. Иванов, А. С. Никифоров // Санкт-Петербург : Политехника, 2000. — 482 с.

9. Чукарин, А. Н. Совершенствование методов расчета виброакустических характеристик процесса виброударного упрочнения деталей на однокоординатных станках с целью обеспечения промышленной безопасности оборудования. / А. Н. Чукарин, С. А. Шамшура // Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2007 г. — 108 с.

10. Чукарин, А. Н. Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки. / А. Н. Чукарин // Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2004 г. — 152 с.

Поступила в редакцию 22.06.2015
Сдана в редакцию 22.06.2015
Запланирована в номер 30.06.2015

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 621.317.328 DOI 10.12737/12591

Оценка электромагнитной обстановки на крыше жилого здания в присутствии антенны сотовой связи[*]

М. Ю. Звездина[1], А. В. Шоков[2], Ю. А. Шокова[3], А. Р. Лебедев[4]**
[1,2,3,4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Electromagnetic radiation security estimation on the residential building roof for cellular antenna [***]

M. Yu. Zvezdina[1], A. V. Shokov[2], Y. A. Shokova[3], A. R. Lebedev[4]**
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы является оценка электромагнитной обстановки на крыше здания с установленной на ней антенной базовой станции системы сотовой связи. Данная задача возникает при проведении профилактических, а также ремонтно-монтажных работ на антенно-фидерных устройствах. Задача оценки экологической экспертизы электромагнитной обстановки на стандартной высоте два метра над поверхностью крыши здания решена методом расчетного прогнозирования. При построении электродинамической модели распределения плотности потока энергии от антенны используются две строгие модели: двухлучевая модель, описывающая отражение плоской электромагнитной волны от плоской идеально проводящей поверхности крыши, а конечные модели крыши описываются с использованием канонической задачи на бесконечном клине. Отличием разработанной модели от известных является возможность проведения исследований не в отдельных расчетных точках, а в пределах всей расчетной плоскости. При проведении моделирования характеристики излучения антенны могут вводиться несколькими способами, в том числе и из паспортных данных на объект излучения, как предложено в известной методике. Приводятся результаты моделирования распределения плотности потока энергии в горизонтальной плоскости в пределах крыши. Расчетные точки размещаются в узлах прямоугольной координатной сетки с периодом в четверть длины волны передатчика. Сформулирована физическая трактовка полученных результатов, сделано заключение о безопасности нахождения людей на крыше при функционирующей антенне системы сотовой связи GSM при использовании антенн с направленными характеристиками.

Ключевые слова: мониторинг электромагнитной обстановки, плотность потока энергии, метод расчетного прогнозирования, дифракция волны на клине.

The work objective is to estimate the electromagnetic environment on the roof where a mobile system base station aerial is installed. The problem arises during maintenance, repair, and assembly operations for antenna-feeder devices. The evaluation problem for ecological assessment of the electromagnetic environment at a standard height of two meters above the roof is solved with the computational prediction method. Two strict models are used for electrodynamic simulation of energy flux density, i.e. a two ray model which describes the plane electromagnetic wave diffraction on the flat perfectly conducting roof surface, and finite models of the roof are described with the canonical problem on a wedge of infinite extent. The difference between the developed model and the known ones lies within the research possibility not only in the computational points but within a whole computational plane. In the simulation process, antenna emission characteristics can be set in a number of ways including those obtained from the radiation object specifications, as it is proposed in a well-known technique. The simulation results for energy flux density distribution in a horizontal plane within the roof space are given. Computational points are placed at the square grid nodes with the period of a quarter wavelength of the transmitter. A physical interpretation of the obtained results is given. A safety conclusion on the human presence on the roof with operating directional cel lular antenna of GSM standard is formulated.

Keywords: electromagnetic environment monitoring, energy flux density, computational prediction method, wave diffraction on a wedge.

Введение. Задачи, связанные с исследованиями экологической ситуации в той или иной области человеческой деятельности, в последнее время приобрели значительную актуальность, что подтверждается большим числом публика-

[*]Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**]E-mail: zvezdina_m@mail.ru, zvezdina_m@mail.ru, zvezdina_m@mail.ru, alex-dipom@mail.ru
[***]The research is done within the frame of the independent R&D.

ций, например, [1–15]. Одним из важных направлений в данной области исследований является мониторинг электромагнитной обстановки [3–5]. Важность данной задачи обуславливается рядом факторов. Во-первых, широким применением радиопередающих устройств, превратившим современные мегаполисы в зоны с высоким уровнем техногенных электромагнитных полей. Во-вторых, невозможностью профилактики электромагнитного загрязнения окружающей среды, поскольку, как отмечено в работе [3], невозможно очистить эфир от нежелательных излучений радиотехнических средств, воздействующих на население.

Одним из значимых источников электромагнитного излучения в городских условиях является сотовая связь, включающая в себя стационарные передающие радиотехнические объекты (базовые станции) и мобильные радиотелефоны. Поскольку количество пользователей мобильными средствами связи в мире оценивается на уровне 2,06 млрд. чел., а в Российской Федерации — более 115 млн. чел. [3–8], то возникает необходимость контроля влияния данных устройств на здоровье населения, что отмечается в работах [3–18].

Целью работы является оценка влияния конечных размеров крыши жилого здания на селитебной территории на величину плотности потока энергии антенны сотовой связи.

Математическая модель расчетного прогнозирования. С точки зрения электромагнитной экологии, как известно, например, из [4, 16], на этапе проектирования места размещения антенны единственным способом анализа электромагнитной обстановки комплекса радиотехнических средств, включающих и антенные устройства, является расчетное прогнозирование, поскольку в этом случае применение известных средств измерения пока является невозможным. Известными программами расчета санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки, являются, например, программный комплекс анализа электромагнитной обстановки, разработанный Самарским отраслевым научно-исследовательским институтом радио [4], а также программа SANZONE, описанная в [19]. Однако главным недостатком разработанных программ является их направленность на расчет частных характеристик оценки электромагнитной обстановки — границ санитарно-защитных зон на высоте 2 метра от поверхности земли по предельно-допустимым уровням. В то же время в соответствии с СанПин [17, п. 3.6] на территориях (крышах), куда исключен доступ людей, не связанных непосредственно с обслуживанием оборудования передающих радиотехнических объектов, должны соблюдаться требования для условий производственных воздействий электромагнитного поля. Таким образом, возникает необходимость визуализации распределения плотности потока энергии в пределах крыши не только на уровне 2 метра, но и на высоте размещения обслуживаемой антенны.

Особенности размещения передающего радиотехнического объекта накладывают ограничения на электродинамическую модель — она должна учитывать не только излучаемую антенной волну, но и волны, отражаемые от плоскости и кромок крыши.

В диапазоне СВЧ, в котором, как следует из анализа данных табл. 1 из [4], функционируют системы сотовой связи GSM и CDMA, длина волны не превышает 1 метра, в связи с этим при проведении экологической экспертизы применяется расчет электромагнитной обстановки в дальней зоне излучения.

Для расчета напряженности поля вблизи антенн сотовой связи применяется соотношение [4, 16]:

$$E = \sqrt{30PG\eta}k_{ф}F(\alpha)F(\varphi)/R, \quad (1)$$

Таблица 1

Основные характеристики некоторых систем сотовой связи

Стандарт	GSM	CDMA
Полоса частот базовая станция – мобильная станция, МГц	935..960	869..894
Полоса частот мобильная станция – базовая станция, МГц	890..915	824..849
Максимальная мощность излучения базовой станции, Вт	50	50

где E — напряженность поля, В/м; P — мощность на входе антенно-фидерного тракта, Вт; G — коэффициент усиления антенны относительно изотропного излучателя в направлении максимального излучения; η — коэффициент полезного действия в антенно-фидерном тракте; R — расстояние от антенны до расчетной точки (наклонная дальность); $F(\alpha)$ — нормированная диаграмма направленности в вертикальной плоскости; $F(\varphi)$ — нормированная диаграмма направленности в горизонтальной плоскости; α, φ — угловые координаты точки наблюдения; $k_{ф} = 1{,}15..1{,}3$ — коэффициент, учитывающий двухлучевую модель распространения в условиях статистически неоднородной среды.

При переходе от напряженности поля к плотности потока энергии (ППЭ) применяется соотношение для пересчета дальней зоны [4]:

$$П = E^2/3{,}77. \quad (2)$$

В данном соотношении напряженность поля E выражается в В/м, а величина ППЭ получается в мкВт/см^2. Для дальней зоны функции $F(\alpha)$ и $F(\varphi)$ имеют смысл паспортной диаграммы направленности. В материалах [4, 16] показано, что если в технической документации на излучающие технические средства не имеется необходимого набора данных по направленным свойствам антенн (диаграммы направленности и коэффициенты усиления), а также данных по антенно-фидерному тракту, то прогнозирование становится весьма затруднительным. Обычно такие ситуации наблюдаются при использовании импортных технических средств. В указанных случаях применяется подход, когда диаграммы направленности $F(\alpha)$ и $F(\varphi)$ определяются в каждом конкретном случае из набора реальных часто случающихся ситуаций.

Для диаграмм направленности в вертикальной плоскости можно выделить следующие ситуации:

- в технической документации приводятся диаграммы направленности (обычно в графическом виде). При этом значения диаграммы направленности в произвольной точке определяются методами интерполяции;

- при использовании в качестве передающей антенны симметричного или несимметричного вибраторов с противовесом. Диаграмма направленности рассчитывается с использованием известного соотношения [20]:

$$F(\alpha)=\frac{cos[\,kl\,sin(\alpha-\psi)]-cos(kl)}{(1-cos(kl)cos(\alpha-\psi)} \quad (3)$$

где l — длина плеча вибратора; $k=2\pi/\lambda$ — волновое число свободного пространства; ψ — угол наклона максимума диаграммы направленности от горизонта;

- при использовании антенн в виде решеток излучателей при расчете диаграммы направленности в вертикальной плоскости применяется только множитель системы [20]:

$$F(\alpha)=\frac{sin\left(n\pi d/\lambda\,sin(\alpha-\psi)\right)}{n\pi d/\lambda\,sin(\alpha-\psi)}, \quad (4)$$

где n — количество этажей в решетке излучателей; d — расстояние между излучателями в вертикальной плоскости;

- в случае полного отсутствия в технической документации параметров и диаграмм направленности антенн, а также невозможности осмотра антенн расчет осуществляется по формулам для равномерно возбужденной синфазной нити тока в виде [20]:

$$F(\alpha)=\left|\frac{sin u}{u}\right|, \quad (5)$$

где $u=\pi a/\lambda \sin(\alpha-\psi)$. Величина a может быть либо измерена, либо рассчитана по известному коэффициенту направленного действия по формуле [20]:

$$a=0{,}5\lambda D. \quad (6)$$

При нахождении диаграммы направленности в горизонтальной плоскости возможны три варианта:

— диаграмму направленности получаем из оцифрованного графика, приведенного в технической документации;

— если антенна обладает ненаправленными свойствами в горизонтальной плоскости, то $F(\varphi)=1$;

— при использовании антенн с секторными диаграммами направленности (в системах сотовой связи) расчет в пределах главного лепестка осуществляется на основе аппроксимационной формулы [20]:

$$F(\varphi)=cos^n(\varphi), \quad (7)$$

где величина n определяется по известной ширине диаграммы направленности по половинной мощности [20]:

$$cos^n(\varphi_{0,5})=0{,}707. \quad (8)$$

Как известно [21], основными техническими средствами базовой станции, обслуживающей соту, являются приемопередатчик и антенна. Характеристика направленности антенны в горизонтальной плоскости выбирается по конфигурации зоны обслуживания [4]. Для равнинной или слабопересеченной местности, как правило, в горизонтальной плоскости формируется ненаправленная (круговая) характеристика направленности. В вертикальной плоскости характеристика направленности должна, во-первых, уменьшить излучение электромагнитной энергии в свободное пространство в секторе углов выше горизонта. С этой целью главный лепесток характеристики наклоняют к Земле на угол φ, который зависит от высоты подвеса антенны и составляет величину 1–2 градуса. Во-вторых, форма диаграммы направленности должна обеспечить равномерную напряженность поля в зоне обслуживания.

Влияние конечных размеров крыши в диапазоне СВЧ учитывается с использованием аппарата геометрической теории дифракции (ГТД) на бесконечном клине [4, 16, 22]. Отказ от учета конечных размеров клина на данном этапе расчетов является, как доказано в работах [4, 16, 23], возможным, поскольку антенна обычно размещается на расстоянии нескольких длин волн от угла крыши, следовательно, вклад данной неоднородности в структуру возбуж-

даемого электромагнитного поля имеет второй порядок малости, а отказ от его учета позволяет существенно сократить объем вычислений.

В соответствии с ним выделяются три зоны, показанные на рис. 1 [22]: I зона, в которой при расчетах учитывается только прямой луч; II зона (зона интерференции) — учитывается как прямой, так и отраженный луч; III зона (зона тени), в которой предполагается, что напряженность поля равна нулю.

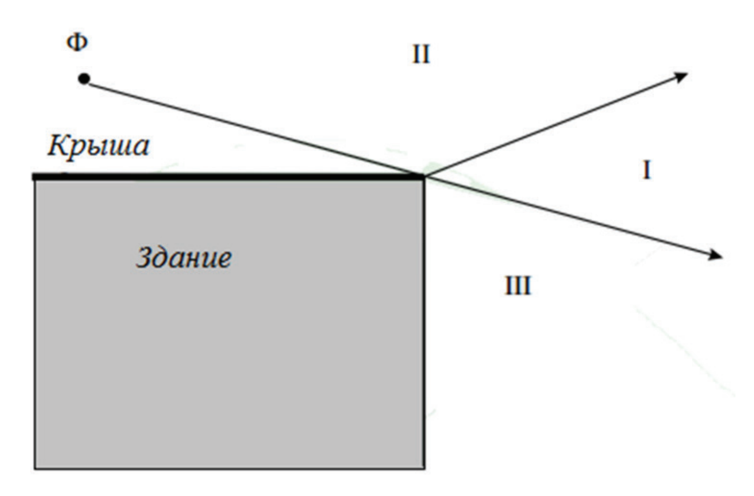


Рис. 1. Деление пространства на зоны в соответствии с ГТД

Ставится задача определения условий нахождения точки наблюдения в указанных зонах для реальных конфигураций крыш и различном размещении антенны относительно крыши. Предполагается, что проекция фазового центра антенны попадает на поверхность крыши.

При оценке электромагнитной обстановки в соответствии с [17] зоной ограничения застройки является территория, где на высоте более двух метров от поверхности земли интенсивность электромагнитного поля превышает предельно допустимый уровень (ПДУ), который для частотного диапазона сотовой связи составляет 10 мкВт/см^2 [18]. Внешняя граница зоны ограничения определяется по максимальной высоте зданий перспективной застройки, на высоте верхнего этажа которых интенсивность электромагнитного поля не превышает ПДУ. Таким образом, при проведении экологической экспертизы возможны два варианта размещения расчетных точек: в горизонтальной плоскости в пределах поверхности крыши; в вертикальной плоскости как в пределах крыши, так и вне её. В первом случае задача возникает при определении режимов работы антенн в период профилактических работ на крыше, во втором — при определении размеров санитарно-защитной зоны. Поскольку размеры статьи ограничены, то остановимся более подробно на решении первой задачи. Как следует из анализа рис. 1, при расчетах ППЭ расчетная точка попадает в зону *II* ГТД.

При проведении расчетов величины ППЭ в соответствии с [16] расчетные точки должны располагаться в пределах поверхности крыши. Для задания положения углов крыши введем декартову систему координат таким образом, чтобы ось *0Y* совпадала с ориентацией на север. В указанной системе координат координаты фазового центра в декартовой системе координат задаются проекциями $\{0,\ \ 0,\ \ h\}$, а координаты точки наблюдения M — $\{x_M,\ \ y_M,\ \ z_M\}$. В выбранной системе координат координаты углов крыши могут быть записаны в виде: $A(x_a, y_a, z_a)$, $B(x_b, y_b, z_b)$, $C(x_c, y_c, z_c)$ и $D(x_d, y_d, z_d)$, а уравнения кромок крыши имеют вид:

$$y = k_{ab}x + a_{ab},\ y = k_{bc}x + a_{bc},\ y = k_{cd}x + a_{cd},\ y = k_{da}x + a_{da}, \tag{9}$$

где $a_{ij} = \dfrac{y_i(x_j - x_i) - x_i(y_j - y_i)}{x_j - x_i}$ — свободный член; $k_{ij} = \dfrac{y_j - y_i}{x_j - x_i}$ — угловой коэффициент уравнения кромки *ij*.

Плотность потока энергии определятся выражением [4]:

$$\Pi = \Pi(\theta_1, \varphi_1, r_1) + \Pi(\theta_2, \varphi_2, r_2)\,. \tag{10}$$

Используемые в данных соотношениях параметры показаны на рис. 2 и находятся на основе формул:

$$\theta_1 = arcsin\left(\frac{h_1 - h_2}{r_1}\right),\quad \theta_2 = \theta_1 + arctg\left(\frac{h_1 + h_2}{\rho}\right) - arctg\left(\frac{h_1 - h_2}{\rho}\right), \tag{11}$$

$$r_1 = \sqrt{\rho^2 + (h_1 - h_2)^2}\ ,\quad r_2 = \sqrt{\rho^2 + (h_1 + h_2)^2}\ , \tag{12}$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi = arctg(\, y_M \,/\, x_M\,)\,,\ \rho = \sqrt{x_M^2 + y_M^2}\ . \tag{13}$$

Результаты моделирования. Для оценки плотности потока энергии, создаваемого на высоте 2 м над поверхностью

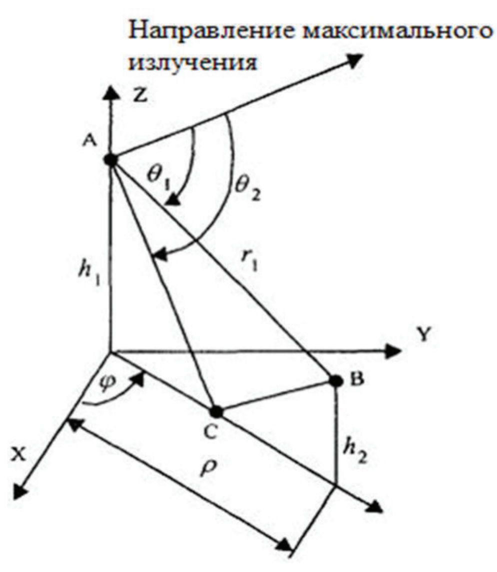


Рис. 2. Отсчет углов при нахождении плотности потока энергии

крыши, были выполнены исследования для следующего варианта размещения антенны. Углы крыши располагались в точках с координатами: $A(0{,}0{,}30)$, $B(-7{,}4{,}30)$, $C(-13.5{,}-4{,}30)$, $D(-2.5{,}-8.5{,}30)$. Фазовый центр антенны размещался над поверхностью крыши на двух высотах — 5 метров и 2 метра, а его горизонтальные координаты выбирались равными: $(-5{,}0{,}35)$ и $(-4{,}2.1{,}35)$. Антенна, функционирующая на частоте 900 МГц в системе сотовой связи GSM, имела мощность передатчика 50 Вт, коэффициент полезного действия антенно-фидерного тракта $\eta = 96\%$, коэффициент усиления $G = 1.6$ [21]. Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости имеет изотропный характер, в вертикальной плоскости имеет вид, представленный на рис. 3. При проведении исследований полагалось, что расчетные точки располагались в пределах площади крыши в узлах прямоугольной координатной сетки с дискретом, равным 0,25 длины волны передатчика.

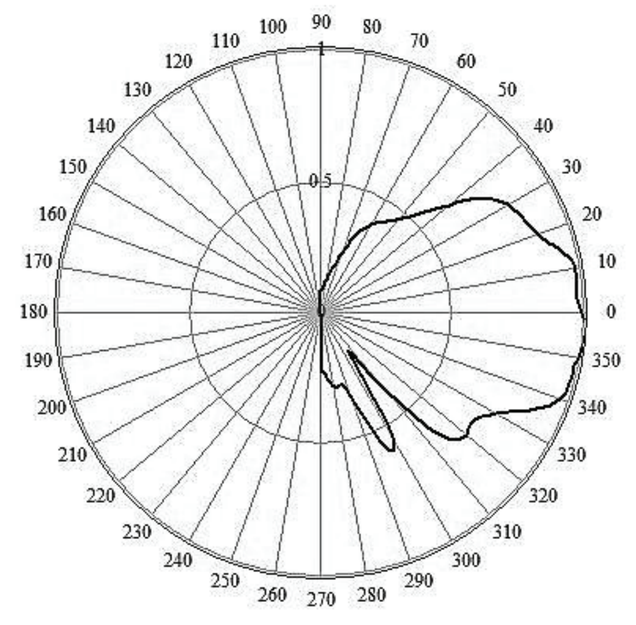
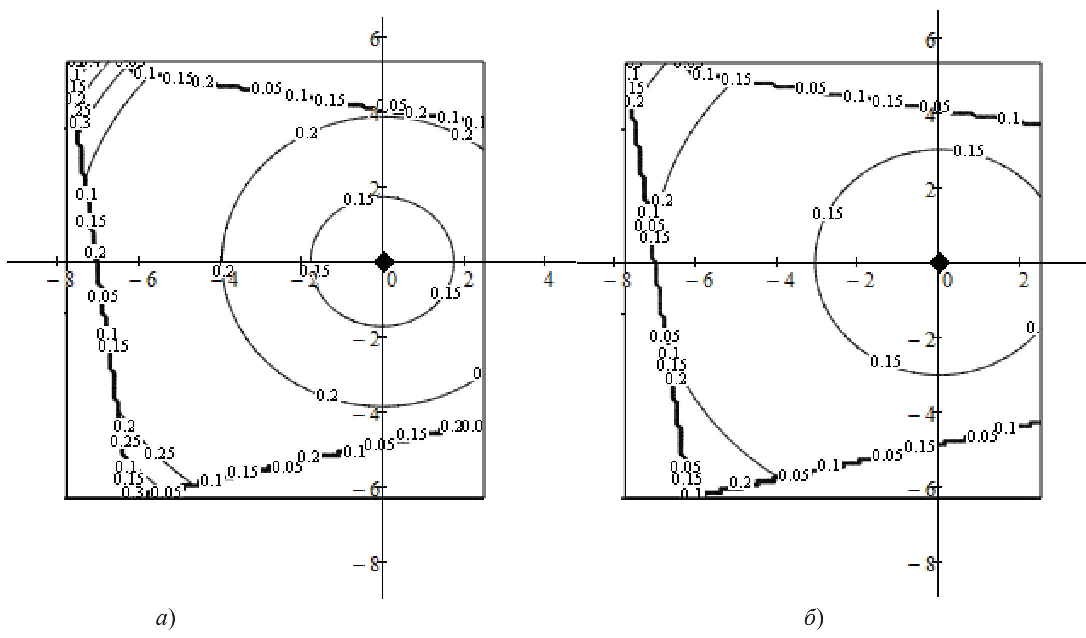


Рис. 3. ДН антенны GSM в вертикальной плоскости

На рис. 4, 5 представлены распределения плотности потока энергии на плоскости, проходящей на высоте 2 метра над поверхностью крыши, для случаев размещения фазового центра антенны на удалении от кромки крыши и

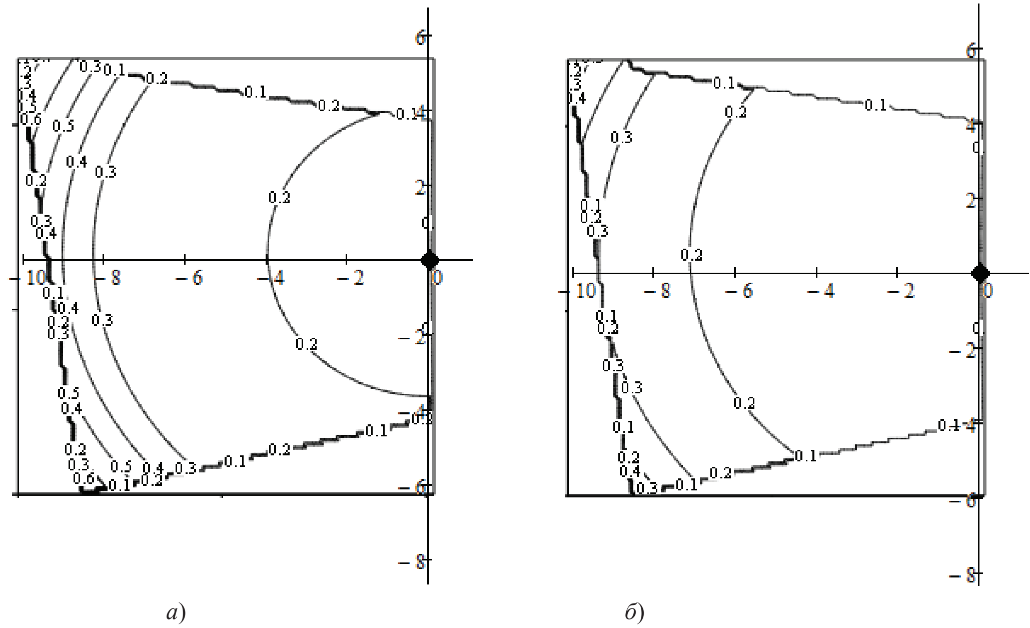
вблизи кромки крыши соответственно. При этом рис. 4–5, *а*) иллюстрируют вариант размещения фазового центра на высоте 5 метров над поверхностью крыши, а рис. 4–5, *б*) — на высоте 2 метра.

Анализ полученных результатов показал, что при размещении антенны базовой станции системы сотовой связи *GSM* на крыше с поперечными размерами примерно 10х10 метров максимальные значения плотности потока энергии составляют в первом случае 0,464 и 0,307 мкВт/см^2, а во втором случае — 0,743 и 0,565 мкВт/см^2 соответственно для первого и второго вариантов размещения фазового центра антенны. По своей величине данные значения намного меньше величины предельно допустимого уровня в 10 мкВт/см^2, что свидетельствует о том, что во время работы антенны можно без ущерба для здоровья человека выходить на крышу.



а) *б*)

Рис. 4. Распределение ППЭ при размещении антенны вдали от кромки крыши



а) *б*)

Рис. 5. Распределение ППЭ при размещении антенны вблизи от кромки крыши

Максимальные величины плотности потока энергии наблюдаются в самом дальнем от фазового центра антенны углу крыши (на рисунках — в верхнем левом). Это обусловлено тем, что данной точке в сферической системе координат соответствует минимальный по сравнению с остальными расчетными точками угол места, уровень диаграммы направленности в вертикальной плоскости для которого в соответствии с паспортными данными наибольший. В непосредственной близости под антенной (углы места порядка — 90 градусов) уровень диаграммы направленности в вертикальной плоскости минимальный, следовательно, и плотность потока энергии минимальна и не превышает 0,2 мкВт/см^2. В горизонтальной плоскости диаграмма направленности антенны изотропна. В связи с этим амплитуда

плотности потока энергии в горизонтальном сечении распределяется симметрично относительно фазового центра антенны.

Более высокое размещение фазового центра антенны относительно поверхности крыши либо размещение вблизи кромки крыши приводит к увеличению максимального значения ППЭ, создаваемой на уровне 2 метра. Указанное явление также связано с формой диаграммы направленности антенны.

Выводы. Применение метода расчетного прогнозирования, а также метода геометрической теории дифракции обеспечивает достаточную для практических целей точность результатов при проведении исследований по экологической оценке электромагнитной обстановки на крыше жилого здания в месте установки антенны сотовой связи *GSM*. Выполненные исследования распределения плотности потока энергии в горизонтальной плоскости, проходящей на высоте 2 метра над поверхностью крыши, для типовых вариантов выполнения антенн сотовой связи *GSM* показали, что создаваемый антенной поток электромагнитной энергии имеет плотность, намного меньшую предельно допустимого уровня в 10 мкВт/см^2. В непосредственной близости под антенной плотность потока минимальна и не превышает 0,15–0,2 мкВт/см^2. Максимальная плотность потока энергии наблюдается при большей высоте подвеса антенны и на наибольших расстояниях от фазового центра антенны. В рассматриваемых случаях размещения фазового центра антенны — это один из углов крыши. Полученное распределение плотности потока энергии в горизонтальной плоскости обусловлено направленными свойствами антенны сотовой связи *GSM* — формой сечений диаграммы направленности в азимутальной и вертикальной плоскостях.

Библиографический список

1. Месхи, Б. Ч. Конечно-элементное моделирование процессов переноса загрязнений в производственной среде с учетом завихрений воздушных потоков / Б. Ч. Месхи, А. Н. Соловьёв, Ю. И. Булыгин, Д. А. Корончик // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — Т. 12. — № 6(67). — С. 10–16.

2. Мишугова, Г. В. Моделирование процесса загрязнения атмосферы / Г. В. Мишугова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — Т. 12. — № 8(69). — С. 12–17

3. Довгуша, В. В. Влияние естественных и техногенных электромагнитных полей на безопасность жизнедеятельности / В. В. Довгуша, М. Н. Тихонов, Л. В. Довгуша // Экология человека. — 2009. — № 12. — С. 3–9.

4. Сподобаев, Ю. М. Основы электромагнитной экологии / Ю. М. Сподобаев, В. П. Кубанов. — Москва : Радио и связь, 2000. — 240 с.

5. Елягин, С. В. Анализ плотности потока энергии (ППЭ) вблизи антенн стандарта *GSM* / С. В. Елягин, В. Е. Дементьев // Вестник Ульян. гос. техн. ун-та. — 2009. — № 3(47). — С. 29–33.

6. Елягин, С. В. Анализ плотностей потока мощности вблизи излучающих антенн / С. В. Елягин // Вестник Ульян. гос. техн. ун-та. — 2008. — № 4. — С. 51–54.

7. Маслаков, М. Д. Проблемы минимизации рисков воздействия электромагнитных полей диапазона радиочастот ≥ 10 кГц до 300 ГГЦ на обслуживающий персонал / М. Д. Маслаков, В. А. Ловчиков, А. Б. Палицын // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2012. — Т. 21. — № 1. — С. 116–120.

8. Гуревич, Е. С. Актуальные задачи санитарно-эпидемиологических экспертиз размещения базовых станций беспроводной радиотелефонной связи / Е. С. Гуревич, Т. С. Попова, О. А. Моисеенко // Здоровье. Медицинская экология. Наука. — 2014. — Т. 58. — № 4. — С. 80–83. [Электронный ресурс]: URL: https://yadi.sk/i/vX4p-x7mZKuuU. (дата обращения : 09.11.14)

9. Fuller, M., Dobson, J. On the significance of the constant of magnetic field sensitivity in animals // Bioelectromagnetics. — 2005. — Vol. 26, № 3. — P. 234–237.

10. A new law SAR antenna structure for wireless handset applications / A.H. Kusuma [et all.] // PIERS. — 2011. — Vol. 112. — P. 23–40. [Электронный ресурс] : URL : http://www.jpier.org/PIER/pier112/02.10101802.pdf. (дата обращения 09.11.2014г.)

11. Hirata, A., Sugiyama, H., Fujiwara, O. Estimation of core temperature elevation in humans and animals for whole-body averaged SAR // PIERS. — 2009. — Vol. 99. — P. 53–70. [Электронный ресурс] : URL : http://www.jpier.org/PIER/pier99/04.09101603.pdf. (дата обращения 9.11.2014г.).

12. Analysis of materials effects on radio frequency electromagnetic fields in human head / M.T. Islam [et all.] // PIERS. — 2012. — Vol. 128. — P. 121–136. [Электронный ресурс] : URL : http://www.jpier.org/PIER/pier128/08.12030105.pdf. (Дата обращения 09.11.2014г.).

13. Mechanisms of RF electromagnetic field absorption in human hands and fingers / Li Chung-Huan [et all] // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniq. — 2012. — Vol. 60. — № 5. — P. 2267–2276.

14. Correlation analysis on the specific absorption rate (SAR) between metallic spectacle and pins exposed from radiation sources / Mat M.H. [et all] // PIERS Proc., Kuala Lumpur, MALAYSIA, March 27–30, 2012. — 2012. — P. 452–455.

15. Pendry, J.B., Schuring, D., Smith, D.R. Controlling electromagnetic fields // Science. — 2006. — Vol. 312. — № 6. — С. 1780–1782.

16. МУК 4.3–1167–02. Методические указания по определению плотности потока мощности электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазонах частот 700 МГц – 30 ГГц. Утверждены Председателем Госкомитета санитарно-эпидемиологического надзора РФ 7 октября 2002 года. Представлены Минсвязи России № НТУ–1/237 от 20.04.01 г. : [Электронный ресурс] : URL : http://bestpravo.ru/rossijskoje/so-instrukcii/t5r.htm. (дата обращения : 12.11.14)

17. СанПин 2.1.8/2.4.1383–03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов. Утв. Главным гос. санитарным врачом России 9 июня 2003 года. Регистрационный номер 4710. Дата введения 30 июня 2003 года.

18. Гигиенические нормативы ГН 2.1.8. / 2.2.4.019-94. Временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой радиосвязи : [Электронный ресурс] : URL : http://www.docload.ru/Basesdoc/5/5222/index.htm. (дата обращения : 20.11.14)

19. Программа SANZONE: [Электронный ресурс]: URL: http://www.ing-tv.ru/index/sanzone/0-53 (дата обращения : 20.12.14).

20. Коротковолновые антенны / Г. З. Айзенберг [и др.]; под ред. Г. З. Айзенберга. — Москва : Радио и связь, 1985. — 536 с.

21.Базовое антенно-фидерное оборудование. Сайт «Радиал» : [Электронный ресурс]: URL: http://www.radial.ru/catalog/antennas/vertical/a3_cdma/ (дата обращения: 14.11.14).

22. Пименов, Ю. В. Линейная макроскопическая электродинамика. Вводной курс для радиофизиков и инженеров. — Долгопрудный : Интеллект, 2008. — 536 с.

23. Захарьев, Л. Н. Теория излучения поверхностных антенн / Л. Н. Захарьев, А. А. Леманский, К. С. Щеглов. — Москва : Сов. радио, 1969. — 230 с.

References

1. Meskhi, B.C., Solovyev, A.N., Bulygin, Y.I., Koronchik, D.A. Konechno-elementnoe modelirovanie protsessov perenosa zagryazneniy v proizvodstvennoy srede s uchyetom zavikhreniy vozdushnykh potokov. [Finite-element modeling of contamination mass transfer process in technological environment with regard to airflow turbulence] Vestnik of DSTU, 2012, vol.12, no. 6(67), pp.10-16 (in Russian).

2. Mishugova, G.V. Modelirovaniye protsessa zagryazneniya atmosfery. [Air contamination process simulation] Vestnik of DSTU, 2012, vol.12, no. 8 (69), pp.12-17 (in Russian.)

3. Dovgusha, V.V., Tihonov, M.N., Dovgusha, L.V. Vliyanie estestvennykh i tekhnogennykh elektromagnitnykh poley na bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. [Natural and technological electromagnetic fields influence on safety of vital activity.] Human Ecology, 2009, no. 12, pp. 3-9 (in Russian).

4. Spodobayev, Y.M., Kubanov, V.P. Osnovy electromagnitnoy ekologii. [Principles of electromagnetic ecology] Moscow: Radio i svyaz', 2000, 240 p. (in Russian).

5. Elyagin, S.V., Dementyev V.E. Analiz plotnosti potoka energii (PPE) vblizi antenn standarta GSM. [Analysis of energy flux density near aerials of GSM standard] Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009, no. 3 (47), pp. 29-33 (in Russian).

6. Elyagin, S.V. Analyz plotnostey potoka moshchnosti vblizi izluchayushchikh antenn. [Measurement of density of power flux with the help of a mobile measurement terminal.] Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2008, no. 4, pp. 51-54 (in Russian).

7. Maslakov, M.D., Lovchikov V.A., Palitsyn, A.B. Problemy minimizatsii riskov vozdeystviya elektromagnitnykh poley diapazona radiochastot $\geq$ 10 kGts do 300 GGts na obsluzhivayushchiy personal. [Problems of minimization of risk of influence of electro-magnetic fields by frequency from 10 kHz to 300 GHz on attendants.] Problems of Technosphere Risk Management, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 116-120 (in Russian).

8. Gurevich, E.S., Popova, T.S., Moiseyenko, O.A. Aktual'nye zadachi sanitarno-epidemiologicheskikh eskpertiz razmeshcheniya bazovykh stantsiy besprovodnoy radiotelefonnoy svyazi. [Actual problems of sanitary-epidemiological expertise base stations of the wireless radiotelephone communication] Health. Medical ecology. Science. 2014, no. 4(58), pp. 80-83. Available at: httpd://yadi.sk/i/vX4p-x7mZKuuU (accessed: 09.11.14) (in Russian).

9. Fuller, M., Dobson, J. On the significance of the constant of magnetic field sensitivity in animals. Bioelectromagnetics, 2005, vol. 26, no. 3, pp. 234-237.

10. Kusuma, A.H., et al. A new law SAR antenna structure for wireless handset applications. PIERS, 2011, vol. 112, pp. 23-40. Available at: http://www.jpier.org/PIER/pier112/02.10101802.pdf. (accessed: 09.11.2014)

11. Hirata, A., Sugiyama, H., Fujiwara, O. Estimation of core temperature elevation in humans and animals for whole-body averaged SAR. PIERS, 2009, vol. 99, pp. 53-70. Available at : http://www.jpier.org/ PIER/pier99/04.09101603.pdf. (accessed: 09.11.2014).

12. Islam, M.T., et al. Analysis of materials effects on radio frequency electromagnetic fields in human head. PIERS, 2012, vol. 128, pp.121-136. Available at : http://www.jpier.org/PIER/pier128/ 08.12030105.pdf. (accessed: 09.11.2014).

13. Li, Chung-Huan, et al. Mechanisms of RF electromagnetic field absorption in human hands and fingers. IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniq. 2012, vol.60, no. 5, pp. 2267-2276.

14. Mat, M.H., et al. Correlation analysis on the specific absorption rate (SAR) between metallic spectacle and pins exposed from radiation sources. PIERS Proc., Kuala Lumpur, MALAYSIA, March 27-30, 2012, pp.452-455.

15. Pendry, J.B., Schuring, D., Smith, D.R. Controlling electromagnetic fields. Science, 2006, vol. 312, no. 6, pp. 1780-1782.

16. MUK 4.3-1167-02. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu plotnosti potoka moshchnosti elektomagnitnogo polya v mestakh gazmeshcheniya radiosredstv, rabotayushchikh v diapazone chastot 700 MGts – 30 GGts. [Methodical guidelines for estimation of power flux density in locations of radio facilities of 700 MHz to 30 GHz]. Appr. by Chairman of State Committee for Sanitary and Epidemiological Supervision on October, 7, 2002. Available at : http://bestpravo.ru/rossijskoje/so-instrukcii/t5r.htm. (accessed: 12.11.14) (in Russian).

17. SanPin 2.1.8/2.4.1383-03. Gigienicheskiye trebovaniya k razmeshcheniyu i ekspluatatsii peredayushchikh radiotekhnicheskikh ob’’yektov. [Hygienic requirements to placement and operation of radio transmitting facilities.] Appr. by Chief public health official of Russia on June 9, 2003. Reg. no. 4710. Effective as of June 30, 2003 (in Russian).

18. Gigienicheskie normativy GN 2.1.8. / 2.2.4.019.Vremennye dopustimye urovni (VDU) vozdeystviya elektromagnitnykh izlucheniy, sozdavaemykh sistemami sotovoy svyazi. [Health standards GN 2.1.8./2.2.4.019-94.Tentative maximum permissible level for emectromagnetic radiation from cellular systems.] Available at: http://www.docload.ru/Basesdoc/5/5222/index.htm. (accessed: 20.11.14) (in Russian).

19. Programma SANZONE. [SANZONE application.] Available at: http://www.ing-tv.ru/index/sanzone/0-53. (accessed: 20.12.14).

20. Aizenberg, G.Z., et al., Aizenberg, G.Z., ed. Korotkovolnovye antenny. [High-frequency antennae.] Moscow : Radio i svyaz’, 1985, 536 p. (in Russian).

21. Bazovoe antenno-fidernoe oborudovanie. [Basic antenna-feeder hardware equipment.] Available at : http://www.radial.ru/catalog/antennas/vertical/a3_cdma/ (accessed: 14.11.14) (in Russian).

22. Pimenov, Y.V. Lineynaya makroskopicheskaya elektrodinamika. Vvodniy kurs dlya radiofizikov i inzhenerov. [Linear macroscopic electrodynamics. Introductory course for radio physicists and engineers.] Dolgoprudniy : Intellect, 2008, 536 p. (in Russian).

23. Zakharyev, L.N., Lemanskiy, A.A., Shcheglov, K.S. Teoriya izlucheniya poverhnostnykh antenn. [Radiation theory for aperture antennas.] Moscow : Sovetskoye radio, 1969, 230 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 26.02.2015
Сдана в редакцию 27.02.2015
Запланирована в номер 30.06.2015

Сведения об авторах

Антибас, Имад Ризакалла,
Imad.antypas@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Венцов, Николай Николаевич,
vencov@list.ru,
Донской государственный технический университет, Россия

Вернигоров, Юрий Михайлович,
jvernigorov@dstu.edu.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Гапова, Марина Анатольевна,
marina_agm@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Гиль, Надежда Алексеевна,
Gilka_77@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Дьяченко, Алексей Геннадьевич,
Dyachenko_aleshka@bk.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Жаров, Виктор Павлович,
spu-42.4@donstu.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Звездина, Марина Юрьевна,
zvezdina_m@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Зубрилина, Елена Михайловна,
Elena-zubrilina@rambler.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Карелина, Мария Юрьевна,
karelinamu@mail.ru
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Россия

Кем, Александр Юрьевич,
akem@DONSTU.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Кипнис, Иосиф Аншелевич,
ikipnis@yandex.ru
ООО «Научно-производственная фирма «КАСИОР, Россия

Коломейченко, Анастасия Александровна,
kolom.anastasiya@gmail.com
Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К. А. Тимирязева

Корчагина, Марина Валерьевна,
ms.korchaginamv@mail.ru
Донской государственный технический университет Россия

Кравченко, Игорь Николаевич,
kravchenko-in71@yandex.ru
Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К. А. Тимирязева, Россия

Крахт, Людмила Николаевна,
lkrakht@mail.ru
Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова, Россия

Лебедев, Алексей Романович,
alex-dipom@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Липкин, Валерий Михайлович,
syan199165@gmail.com
ЮРГПУ(НПИ), Россия

Меркер, Эдуард Эдгарович,
merker@inbox.ru
Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова, Россия

Мирошниченко, Игорь Павлович
Ipmir@rambler.r
Донской государственный технический университет, Россия

Могилевская, Надежда Сергеевна
broshka@nm.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Науменко, Александр Александрович,
Sashajalempi@gmail.com
ЮРГПУ(НПИ), Россия

Нейдорф, Рудольф Анатольевич,
ran_pro@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Обухова, Елена Николаевна,
elena21@spark-mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Погорелов, Вадим Алексеевич,
Ipmir2011@yandex.ru
Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи, Россия

Полетаев, Валерий Юрьевич,
afshor@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Полетаев, Юрий Вениаминович,
anclav51@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Рогозин, Дмитрий Викторович,
dmrogozin@ya.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Рязанов, Александр Николаевич,
alexandr_r89@mail.ru
Ростовский колледж связи информатики, Россия

Сергеев, Александр Сергеевич
Sergeev00765@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Сизов, Валерий Павлович,
Ipmir2011@yandex.ru
Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи, Россия

Смехунов, Евгений Антонович,
Smehunov@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Степанов, Виктор Александрович,
viktor1990_31@mail.ru
Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова, Россия

Чернышев, Юрий Олегович,
myvnn@list.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Чугунный, Константин Алексеевич,
kyberprizrak@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Чукарин, Александр Николаевич,
Донской государственный технический университет, Россия

Шоков, Андрей Викторович,
zvezdina_m@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

Шокова, Юлия Александровна,
zvezdina_m@mail.ru
Донской государственный технический университет, Россия

INDEX

Obukhova, Elena N., elena21@spark-mail.ru — Don State Technical University, Russia

Pogorelov, Vadim A., Ipmir2011@yandex.ru — Rostov Scientific Research Institute for Radiocommunication, Russia

Poletaev, Valery Yu., anclav51@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Poletaev, Yuri V., anclav51@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Rogozin, Dmitri V., anclav51@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Ryazanov, Alexander N., alexandr_r89@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Sergeyev, Alexander., sergeev00765@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Shokov, Andrey V., zvezdina_m@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Shokova, Yulia A., zvezdina_m@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Sizov, Valery P, Ipmir2011@yandex.ru — Rostov Scientific Research Institute for Radiocommunication, Russia

Smekhunov, Evgeny A., smehunov@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Stepanov, Victor A., Viktor1990_31@mail.ru — Stary Oskol Technological Institute after A.A.Ugarov, Russia

Ventsov, Nikolay N., vencov@list.ru — Don State Technical University, Russia

Vernigorov, Yury M., jvernigorov@dstu.edu.ru — Don State Technical University, Russia

Zharov, Victor P., spu-42.4@donstu.ru — Don State Technical University, Russia

Zubrilina, Elena M., Elena-zubrilina@rambler.ru — Don State Technical University, Russia

Zvezdina, MarinaYu., zvezdina_m@mail.ru — Don State Technical University, Russia